А. И. АДАМЕНКО

ОДНОФАЗНЫЕ КОНДЕНСАТОРНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНСКОЙ ССР
ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

А. И. АДАМЕНКО

ОДНОФАЗНЫЕ КОНДЕНСАТОРНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК
УКРАИНСКОЙ ССР
КИЕВ — 1960

В книге приведены результаты исследования асинхронных однофазных конденсаторных двигателей с короткозамкнутым ротором. Основное внимание уделено использованию трехфазных двигателей единой серии в качестве однофазных. Отмечены схемы, которые могут оказаться наиболее подходящими для электрификации сельского хозяйства. Рассматриваются вопросы, связанные с проектированием конденсаторных двигателей и методами их исследования. Рассматриваются способы автоматического управления пуском однофазных конденсаторных двигателей.

Книга рассчитана на специалистов, работающих с однофазными конденсаторными двигателями.

Ответственный редактор
доктор технических наук *И. М. Постников*

ПРЕДИСЛОВИЕ

Однофазные конденсаторные двигатели (ОКД) применяются во многих отраслях народного хозяйства. В частности, применение их в сельском хозяйстве связано с тем, что более выгодным оказывается распределять электрическую энергию при смешанных трехфазно-однофазных сетях.

На электрические сети в сельском хозяйстве приходится наибольшая часть капитальных затрат при электрификации. Использование же однофазных сетей позволяет уменьшить эти затраты. Железнодорожный транспорт наиболее выгодно электрифицировать однофазным переменным током. Последний широко используется также в быту. Сельскохозяйственные машины маломощны. Их могут приводить в движение однофазные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором.

Асинхронные ОКД — самые простые двигатели с удовлетворительными пусковыми и рабочими характеристиками. Они имеют высокие коэффициент мощности и к. п. д., что уменьшает потери энергии в протяженных сельских сетях.

В конденсаторных двигателях можно получить пусковые моменты, наилучшим образом удовлетворяющие требованиям привода. Конденсаторы используются для получения токов, сдвинутых по фазе, или, как говорят, для расщепления фаз. В процессе разгона параметры двигателя изменяются в четыре—семь раз. Для получения токов, сдвинутых по фазе на один и тот же угол, необходимо в таких же пределах изменять и величину емкости. При неизменной емкости только при одной скорости может возникнуть круговое вращающееся поле в воздушном зазоре машины и наступить уравновешенный режим.

При номинальной скорости используется рабочая емкость. Если момент на валу двигателя уменьшается и скорость вращения оказывается выше номинальной, увеличивается индуктивное сопротивление обмоток, что приближает цепь к резонансу, так как в одной из фаз конденсаторного двигателя преобладает емкостное сопротивление. Ток по крайней мере одной из фаз увеличивается. Конденсаторные двигатели могут поэтому перегреваться как при повышении нагрузки, так и при уменьшении ее. При увеличении рабочей емкости возрастают опрокидываю-

щий момент и перегрузочная способность и сильнее проявляются резонансные явления при холостом ходе двигателя.

От величины пусковой емкости зависит кратность пускового момента, а также возможность и время разгона. Выбору рабочей и пусковой емкости при проектировании ОКД уделяется большое внимание. При использовании трехфазных двигателей в качестве однофазных рабочая емкость выбирается из условия равенства токов фаз номинальному току также в случае, когда обмотки не симметричны и магнитное поле не круговое.

Схема включения ОКД должна обеспечивать соответствие номинальных напряжений сети и двигателя. Проведенные нами исследования показывают, что схемы, в которых емкость присоединяется параллельно одной из фаз (схемы с последовательным включением обмоток), и схемы ОКД с включением обмоток статора в треугольник более приемлемы. Конденсаторная батарея в этих схемах не подвергается перенапряжениям, имеющим место в схеме с параллельным включением обмоток. Мощности конденсаторных батарей двигателей с последовательным и параллельным включением обмоток в уравновешенном режиме равны.

Двигатели с трехфазной обмоткой, включаемой в звезду и треугольник, при использовании индуктивности и емкости имеют номинальную мощность, равную мощности исходного двигателя. При включении обмоток в звезду или треугольник третья пространственная гармоника намагничивающей силы отсутствует. Это позволяет использовать серийные двигатели малой мощности с диаметральными обмотками статора ОКД.

Схемы ОКД исследуются в данной работе при помощи метода симметричных составляющих (координат). Приводится единая методика для определения приведенных значений сопротивлений намагничивающей и вторичной цепей схем замещения. На примере однофазного включения трехфазного двигателя показывается эквивалентность методов трех и двух координат и метода двух вращающихся в противоположные стороны полей. Приводятся теоретический и экспериментальный способы определения параметров двухфазного двигателя с несимметричными обмотками.

В заключение рассматриваются некоторые способы автоматического управления пуском ОКД.

При проведении опытов большую помощь автору оказали инженеры Г. М. Киричек, Б. А. Никитин, В. С. Яковлев, и В. В. Ралле. При просмотре рукописи ряд ценных замечаний сделал кандидат технических наук инженер-подполковник Н. Г Алюшин. Всем товарищам, оказавшим помощь в работе, автор выражает глубокую признательность.

Автор считает своим приятным долгом выразить глубокую благодарность доктору технических наук профессору И. М. Постникову за всестороннюю помощь и ценные замечания.

Глава I

ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ОДНОФАЗНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

История развития однофазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором неразрывно связана с историей открытия вращающегося магнитного поля. В 80—90-х годах XIX ст. применялись только однофазные электрические сети. Двигатели также были однофазные (репульсионные двигатели, изобретенные И. Томсоном в 1887 г.). В 1888 г. итальянский физик Г. Феррарис и сербский инженер Н. Тесла открыли вращающееся магнитное поле. Уже при первых опытах Г. Феррарис получил вращающееся магнитное поле при помощи двух протекающих по двум катушкам переменных токов, полученных от однофазной сети при помощи так называемого расщепления фаз. В цепь одной катушки Г. Феррарис включил активное сопротивление, в цепь другой — большое индуктивное сопротивление. Сконструированный Г. Феррарисом прибор, основанный на индукционном принципе, предназначался для измерительных целей; в нем впервые была использована идея вспомогательной, или искусственной фазы.

Инженер Шалленбергер в 1888 г. предложил счетчик с двумя катушками. Магнитный поток, созданный одной из них, индуктировал ток во второй; при этом катушки располагались так, что оси их составляли угол 45°. Внутри второй катушки размещался диск счетчика. Это был первый индукционный двигатель типа современных с экранированным полюсом.

В 1890 г. французские электрики Ютен и Леблан сконструировали двигатель с двухфазной обмоткой статора, в котором при помощи конденсатора получен угол сдвига фаз токов 90°. Ротор также был двухфазным; в цепь его включались реостаты.

Изобретение М. О. Доливо-Добровольским в 1889 г. трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором оказало большое влияние на однофазные двигатели. Уже однофазный двигатель, предложенный Ч. Броуном в 1893 г. с индук-

тивностью во вспомогательной, включаемой на время пуска, обмотке, был с короткозамкнутым ротором. Обмотка статора первых однофазных двигателей была фактически двухфазной. С развитием трехфазных двигателей были разработаны также схемы включения их на однофазную сеть. В июле 1897 г. на собрании Союза германских электриков в дискуссии по докладу Г. Гергеса о возможности пуска двухфазного двигателя от однофазной сети М. О. Доливо-Добровольский сообщил о найденном им способе питания трехфазного двигателя однофазным током. Это сообщение относилось к однофазному двигателю, с трехфазной обмоткой (см. табл. 2, тип № 2, а), с использованием индуктивного и активного сопротивлений ($z_1=x$, $z_2=R$).

Большую работу по усовершенствованию однофазных конденсаторных двигателей провели Штейнметц, а также В. Финн, предложивший последовательное соединение двух фаз статора и шунтирование одной из них конденсаторами [50].

В 20—30-х годах XX ст., когда конденсаторы начали широко использовать для повышения коэффициента мощности в электрических сетях, в устройствах радиосвязи и конденсаторостроение достигло значительных успехов, асинхронные ОКД с короткозамкнутым ротором получили значительное распространение.

К этому времени относятся многие исследования по ОКД [16—35]. В Советском Союзе эти исследования связаны, во-первых, с разработкой двигателя для электрифицированных однофазным переменным током железных дорог (предполагалось [25—33] использовать конденсаторный двигатель в качестве тягового для магистральных электровозов), во-вторых, с электрификацией сельского хозяйства [1, 26—30, 35].

Уже в 1937 г. стала очевидной необходимость широкого применения ОКД для электрификации производственных процессов в сельском хозяйстве. В связи с этим появились работы, посвященные методам исследования и расчета ОКД, выбору параметров и схем включения обмоток статора, определению условий, при которых в воздушном зазоре возникает круговое вращающееся магнитное поле, расчету пусковых и рабочих характеристик, пусковой и рабочей емкости.

В 1934 г. академик В. С. Кулебакин установил, что наиболее выгодны ОКД с двухфазной симметричной обмоткой статора [25], успешно использованные для привода шахтного конденсаторного электровоза [36], однако до последнего времени остается актуальной проблема использования трехфазных двигателей в качестве ОКД [12, 38, 39, 47, 71, 99, 100].

При этом оказывается, что не всегда трехфазные двигатели можно использовать в качестве ОКД. В однофазных двигателях высшие гармоники м. д. с. проявляются более сильно [43, 46, 54, 68, 70, 71]. Магнитное поле в них — большей частью и для большинства гармоник — эллиптическое. Движущий момент от

основной гармоники определяется как разность моментов прямого и обратного полей, в то время как паразитные моменты от прямого и обратного полей суммируются.

Большое внимание привлекают к себе также ОКД с двухфазной несимметричной обмоткой статора [37, 42, 44—48, 51, 68, 70].

Работы, посвященные методам теоретического исследования ОКД [18, 23, 29, 31, 32, 35, 38, 44, 51, 54, 70], до настоящего времени не сходят со страниц печати. При этом, однако, двигатели с двухфазными обмотками статора, смещенными в пространстве на угол, не равный 90°, еще не исследованы.

Область применения

ОКД широко применяются в промышленности, на транспорте, в сельском хозяйстве, в медицинских приборах, в быту.

В промышленности они применяются в устройствах автоматики в качестве исполнительных двигателей и моторных реле [48, 93, 94], на транспорте — для вспомогательного привода на магистральных электровозах однофазного переменного тока [92, 96]. В шахтных конденсаторных электровозах используются двухскоростные однофазные двигатели мощностью 23/12 *квт* при 1000 и 500 об/мин [36]. В быту однофазные двигатели применяются для привода стиральных и швейных машин, вентиляторов, пылесосов, полотеров, проигрывателей, магнитофонов, холодильников, кухонных комбайнов.

Особенно большие возможности для применения ОКД открываются в связи с электрификацией сельского хозяйства, что объясняется некоторыми ее особенностями, а именно:

1. Большая распыленность потребителей электроэнергии. Рабочие машины оказываются рассредоточенными на большом пространстве. Подвод энергии к ним затруднен.

2. Сезонность основных сельскохозяйственных работ. Продолжительность использования машин составляет 100—600 час/год.

3. Работы, на которые расходуется наибольшее количество энергии, связаны с передвижением по полю, что затрудняет подвод энергии к машинам.

Указанные особенности приводят к тому, что капитальные затраты на электрификацию производственных процессов в сельском хозяйстве значительно превышают подобные затраты в промышленности.

Стоимость электрических сетей вместе с трансформаторными подстанциями составляет 68% стоимости всего электрооборудования, необходимого для электрификации сельского хозяйства. В сетях расходуется около 95% проводникового материала [3].

Одним из способов удешевления сетей является применение земли в качестве проводника. Для электрификации сельского хозяйства с начала 30-х годов в СССР по предложению Всесоюзного института электрификации сельского хозяйства (ВИЭХС) начала применяться система два провода — земля (ДПЗ).

Для сельского хозяйства в 1938 г. А. Г. Захарин и И. А. Будзко предложили так называемую трехфазно-однофазную систему электроснабжения [1, 2], при которой мощные потребители присоединяются к трехфазной сети, мелкие и более удаленные—к однофазной.

Трансформаторные подстанции выполняются однофазными и сооружаются в непосредственной близости от потребителей. Линии электропередач — одно- и двупроводные.

Проведенные в Советском Союзе исследования показали, что трехфазно-однофазная система распределения электроэнергии в сельском хозяйстве сокращает затраты металла примерно вдвое, а стоимость сетей и подстанций — на 15—25% по сравнению с трехфазной системой электроснабжения [1—4]. Эти выводы подтверждаются также опытом других стран [89].

В настоящее время Московский трансформаторный завод выпускает однофазные масляные сельские трансформаторы типов ОМС-5/6, ОМС-5/10, ОМС-10/10 мощностью 5 и 10 *ква* с первичным напряжением 6 и 10 *кв*, что позволяет наилучшим образом использовать преимущества смешанной системы распределения электроэнергии.

В СССР ведется большая работа по электрификации железнодорожного транспорта. К 1965 г. будет электрифицировано до 20 000 *км*, а к 1970 г. — 40 000 *км* железных дорог. Наиболее перспективна система энергоснабжения электровозов однофазным переменным током промышленной частоты (50 *гц*); эта система позволяет уменьшить число требуемых трансформаторных подстанций, расход меди на контактную сеть и эксплуатационные расходы. В магистральных электровозах конденсаторные двигатели применяются для вспомогательного привода, а не в качестве основных тяговых двигателей. В связи с борьбой за улучшение качества, уменьшение веса и габаритов конденсаторов вновь возникает задача применения ОКД для тяги как в магистральных и шахтных электровозах, так и в моторвагонных секциях, на торфоразработках и для сельскохозяйственного электротранспорта.

Большое значение для механизации и уменьшения стоимости работ по обслуживанию путей уже в настоящее время приобретают однофазные двигатели, используемые в переносных и ручных железнодорожных инструментах — в электрошпалоподбойках, шлифовальных, рельсорезных, рельсосверлильных станках и т. п.

В семилетнем плане развития народного хозяйства СССР предусматривается широкое внедрение комплексной автоматизации в промышленность, транспорт и в сельское хозяйство. Значительно увеличивается производство бытовых машин и приборов. В бытовых машинах, в медицинских аппаратах, в устройствах автоматики, в электроинструментах применяются двигатели мощностью до 600 *вт,* так называемые микродвигатели, выпуск которых в 1965 г. увеличится в пять раз по сравнению с выпуском их в 1958 г.

Стоимость годового выпуска микродвигателей значительно превосходит стоимость годового выпуска турбо- и гидрогенераторов. С развитием автоматизации производственных процессов и электрификации быта этот перевес микродвигателей будет непрерывно увеличиваться, что вызовет также значительное увеличение расхода материалов. Если на 1 *квт* мощности турбогенераторов требуется около 2 *кг* конструктивных и активных материалов, то в микродвигателях вес материалов на 1 *квт* достигает 50 *кг* и более.

В подавляющем большинстве микродвигатели однофазные. Поэтому важное значение приобретают вопросы повышения экономичности, надежности, а также методы расчета однофазных двигателей.

Мощность применяемых в сельском хозяйстве и в быту электрических двигателей. Основные требования к ОКД

Существующие сельскохозяйственные машины в большинстве своем тихоходны. Поэтому переход на электрический привод для сельскохозяйственного машиностроения влечет более высокие скорости, дробление мощностей и применение многодвигательного привода. Мощность большинства сельскохозяйственных машин невелика, поэтому здесь в большинстве случаев применяются двигатели малой мощности. В табл. 1 приведено распределение сельскохозяйственных машин по потребляемой мощности [10] и мощностей электродвигателей, применяемых в сельском хозяйстве [9].

Таблица 1

Мощность машин, *квт*	Количество машин, %	Мощность двигателей, *квт*	Количество двигателей, %
До 0,5	29	До 1	40
0,51—2,2	28	1—5	26
2,3—4,5	15	5,1—10	7
4,6—13	18,4	Более 10	27
Более 13	9,4	—	—

Наиболее широко применяются двигатели малой мощности: 66% двигателей имеют мощность до 5 *квт*. Применение многодвигательного привода еще больше увеличит их количество.

Однако и для машин мощностью более 13 *квт* могут быть использованы ОКД [91]. Мощность бытовых машин также мала: двигателей стиральных машин—200—500 *вт*.

Серийные трехфазные двигатели в основном удовлетворяют всем требованиям сельского хозяйства [5]. Общепринято, что для привода сельскохозяйственных машин более приемлемы трехфазные двигатели с вытеснением тока в роторе.

Серии однофазных двигателей мощностью выше 0,6 *квт* в настоящее время не разработаны. По-видимому, в однофазных двигателях короткозамкнутый ротор также должен быть с вытеснением тока, хотя по этому вопросу имеются противоречивые высказывания.

Г. Н. Петров и Ю. С. Чечет [5], рассматривая применение трехфазных двигателей в качестве однофазных, не предъявляют каких-либо требований к ротору. Д. И. Секретев [43] считает двигатель с вытеснением тока в роторе неприемлемым для работы в качестве ОКД, с чем, однако, согласиться нельзя [71].

В работе [47] Ю. С. Чечет предложил использовать трехфазные двигатели в качестве однофазных по схемам с пусковой мощностью, с пусковым сопротивлением, с пусковой и рабочей емкостями. Для сельскохозяйственного электропривода это предложение ценно, так как позволяет использовать двигатели единой серии в качестве одно- и трехфазных в зависимости от имеющейся сети трехфазно-однофазной системы распределения электроэнергии.

Для бытовых машин двигатели проектируются однофазными с двухфазной симметричной обмоткой статора. Однофазные двигатели с конденсаторным пуском наиболее выгодны при последовательном включении двух обмоток статора, смещенных на угол, больший 90°, т. е. так называемые однофазные микродвигатели с конденсаторным пуском без пусковой обмотки.

Величину пускового момента конденсаторных двигателей можно изменять в широких пределах. Практически, однако, рационально принять для однофазных двигателей кратность пускового момента, равную таковой в трехфазных двигателях. Для привода вентиляторов и других машин с вентиляторным моментом сопротивления можно применить ОКД с одной рабочей емкостью.

Схемы однофазных двигателей

Имеется много различных типов асинхронных двигателей однофазного переменного тока с короткозамкнутым ротором. Классическим примером однофазного двигателя является трехфазный двигатель с отключенным одним линейным проводом (см. табл. 2, строка *1*). Независимо от того, соединены ли обмотки двигателя в треугольник или в звезду, характеристики его аналогичны характеристикам двигателя с одной обмоткой,

занимающей $\frac{2}{3}$ числа пазов статора (фазная зона равна 120°) [72]. Известно, что такие двигатели имеют неудовлетворительные пусковые свойства; пусковой момент их равен нулю. Для улучшения пусковых и рабочих характеристик обмотка статора разбивается на несколько частей (фаз). Обычно применяют однофазные двигатели с трех- и двухфазной обмоткой статора. Трехфазная обмотка статора может быть включена в звезду и в треугольник, параллельно и последовательно. Две фазы обмотки статора могут быть включены параллельно или последовательно.

Для получения вращающегося поля в воздушном зазоре машины токи в обмотках должны отличаться по фазе. Сдвиг фаз между токами можно получить при включении активных, индуктивных или емкостных сопротивлений. Для пуска двигателя могут быть использованы все три типа сопротивлений. Во время нормальной работы сдвиг фаз между токами достигается включением емкостного сопротивления, а число используемых реактивных сопротивлений в среднем равно двум; поэтому можно отметить по крайней мере 6×3×2×2=72 разновидности схем однофазных двигателей с короткозамкнутым ротором.

Число возможных схем однофазных двигателей окажется большим, если рассматривать несимметричные обмотки статора. Практическое значение имеют однофазные двигатели с несимметричными двухфазными обмотками статора, которые могут отличаться по величине фазных зон и углу сдвига в пространстве. Расположение обмоток под углом $\Theta^{np}_{q} \neq 90°$ может иметь место как при параллельном, так и при последовательном их включении. Особенно важное значение имеет последняя схема для однофазных двигателей с конденсаторным пуском.

Двигатели с экранированным полюсом по существу имеют произвольно смещенные в пространстве две обмотки, одна из которых замкнута накоротко.

Однако только небольшая часть схем однофазных двигателей применяется в настоящее время. Некоторые схемы, например табл. 2, *2, а, 3, а,* не получили распространения из-за несоответствия напряжений сети и двигателя. Другие схемы недостаточно изучены и мало используются для однофазных двигателей.

ОКД с трехфазными обмотками статора, соединенными в звезду и в треугольник, применяются мало, по-видимому, вследствие того, что для этого необходимо два сопротивления: индуктивное и емкостное, кроме того, схемы табл. 2, *2,в; 3,в,* использующие одно емкостное сопротивление, позволяют получить режимы работы без обратного поля (уравновешенные режимы) только при значениях внутреннего коэффициента мощности двигателя, равных 0,5.

Коэффициент мощности двигателя по отношению к сети при этом также невелик; $\cos \varphi_c = 0{,}866$. Однако эти схемы имеют и положительные свойства, например, возможность полного ис-

пользования мощности габарита, соответствие напряжений двигателя и сети, отсутствие моментов третьих пространственных гармоник.

Наиболее распространены и изучены так называемые ОКД с расщепленной фазой, т. е. с двухфазной обмоткой статора и с параллельным включением обмоток (табл. 2, *4*). Для расщепления фаз в общем случае необходимо включить дополнительные сопротивления в цепь фаз d и q. Наиболее часто сопротивление $z_q = 0$, $z_d = R$. Фаза q включается на полное напряжение сети. Последовательно с фазой d, которая работает только во время пуска и называется пусковой, включается активное сопротивление (табл. 2, *4,б*). По описанной схеме выполняются однофазные асинхронные двигатели типа АОЛБ. Фаза q занимает в большинстве случаев $^2/_3$ обмоточного пространства. Фаза d— $^1/_3$ пазов статора; последняя выполняется проводом меньшего сечения. Добавочных сопротивлений при этом не требуется, двигатель компактный, хотя коэффициент использования габарита невелик.

Чтобы повысить мощность двигателя, так называемую вспомогательную фазу включают через емкость, выбираемую из условий получения уравновешенного режима при номинальной нагрузке (табл. 2, *4,в*). Повышение мощности двигателя с рабочей емкостью зависит от параметров обмоток и может достигать до 100% мощности двигателя с пусковой обмоткой.

Кроме того, двигатели, приведенные в табл. 2, *4, в, г,* в номинальном режиме имеют высокий коэффициент мощности, меньше потери и пусковой ток, больший максимальный момент.

Если в схеме ОКД предусмотреть пусковую емкость, отключаемую после разгона, то двигатель приобретает хорошие пусковые характеристики. Но как бы ни выбиралась емкость в обмотке q, уравновешенный режим ОКД возможен при одной какой-либо скорости.

Схемы табл. 2, *5,* предложенные академиком В. С. Кулебакиным, позволяют получить уравновешенный режим двигателя при любых скоростях и параметрах обмоток, используя при этом только реактивные сопротивления.

Однофазные двигатели с последовательным включением обмоток (табл. 2, *6, в*) предложены в 1909 г. [50], но до последнего времени не использовались. В общем случае обмотка q может быть шунтирована любым сопротивлением.

При использовании активного сопротивления, шунтирующего фазу q (табл. 2, *6, а*) его необходимо отключить, так же как и пусковую обмотку в схеме, приведенной в табл. 2, *4, б,* после окончания пуска. Однако в случае применения двигателей, показанных в табл. 2, *6, а,* вся обмотка статора используется и при номинальной скорости.

В ОКД при последовательном включении обмоток (табл. 2, *6, в, г*) конденсаторы не подвергаются перенапряжениям

Таблица 2

№ п/п	Двигатель	Основные схемы	Напряжение однофазной сети	Использование мощности габарита
1	Однофазный с одной обмоткой на статоре	а) б) в)		50—70%
2	Однофазный с трехфазной обмоткой статора, соединенной в звезду	а) Z_C C A Z_B B б) A B C Z_{AC} Z_{BC} в) A B C C	$U=\sqrt{3}\,U_{нф}$	100%
3	Однофазный с трехфазной обмоткой статора, соединенной в треугольник	а) Z_1 A C Z_2 B б) A B C Z_C Z_B в) A C B C	$U=U_{нф}$	100%

Продолжение табл. 2

№ п/п	Двигатель	Основные схемы	Напряжение однофазной сети	Использование мощности габарита
4	Однофазный с двухфазной обмоткой статора, соединенной параллельно при $\Theta_q^{пр}=90°$	а) Z_d, Z_q, I_d U_d, q; б) d, q, R; в) d, q, C_P; г) $C_п$, C_p, d, q	$U=U_{нф}$	б) 50—70% в, г) 94%
5	Однофазный с двухфазной обмоткой статора, соединяемой по схеме В. С. Кулебакина	а) q, d; б) q, d; в) d, d	$U=U_q$	94%
6	Однофазный с двухфазными последовательно соединенными обмотками, смещенными на угол $\Theta_p^{пр}=90°$	а) d, q; б) d, q; в) d, q, C; г) C, q, d	$U=\sqrt{U_d^2+U_q^2}$	б) 70—80% в, г) 94%

7	Однофазный с двухфазными последовательно соединенными обмотками статора с двумя шунтирующими сопротивлениями	а) d, q; б) d, q; в) d, q	$U = \sqrt{U_d^2 + U_q^2}$	94%
8	Однофазный с двухфазными параллельно соединенными обмотками, смещенными на угол $\Theta_q^{пр} \neq 90°$	C, q, d	$U = U_q$	50—70%
9	Однофазный с двухфазными последовательно соединенными обмотками, смещенными на угол $\Theta_q^{пр} \neq 90°$	а) d, q, C; б) R; в) $C_п$; г) C, $C_{р}$		50—70%

Продолжение табл. 2

№ п/п	Двигатель	Основные схемы	Напряжение однофазной сети	Использование мощности габарита
10	Однофазный с экранированным полюсом			
11	Однофазный с трехфазной обмоткой статора при параллельном соединении главной и вспомогательной обмотки	а) R; б) C; в) C	а, б) $U=\sqrt{3}\,U_{нф}$ в) $U=U_{нф}$	а) 50—70% б, в) 70—85%
12	Однофазный с последовательно-параллельным включением трехфазной обмотки статора	а) C_A, C_B; б) R_A, R_C; в); г) C_A, C_C, A, B, C	$U=\sqrt{3}\,U_{нф}$	б) 50—70% а, в, г) 100%

13	Однофазный с трехфазными обмотками статора, соединенными в звезду с последовательной и параллельной емкостями		$U=\sqrt{3}\,U_{\text{нф}}$	94—100%
14	Однофазный с трехфазными параллельно соединенными обмотками статора		$U=U_{\text{нф}}$	94—100%
15	Однофазный с трехфазными последовательно соединенными однократно шунтированными обмотками статора		$U=2U_{\text{нф}}$	б) 50—70% а, в) 70—85%
16	Однофазный с трехфазными последовательно соединенными двукратно шунтированными обмотками статора		$U=2U_{\text{нф}}$	90—93%

Продолжение табл. 2

№ п/п	Двигатель	Основные схемы	Напряжение однофазной сети	Использование мощности габарита
17	Однофазный с трехфазными последовательно соединенными и трехкратно шунтированными обмотками статора		$U=2U_{нф}$	94—100%
18	Однофазный с переключением обмоток во время пуска с параллельного на последовательное соединение		$U=2U_{нф}$	70—85%
19	Однофазный с конденсаторным пуском с переключаемыми смещенными в пространстве на угол больше 90° обмотками		—	50—70%

при включении и особенно при отключении от сети двигателя. Высшие гармоники, создающие паразитные моменты, проявляются меньше. Для получения уравновешенного режима двигателей с шунтированием фазы q конденсаторами требуется определенное соотношение параметров обмотки и конденсаторов. Если используется емкость без потерь, уравновешенный режим двигателей, приведенных в табл. 2,*6,в,г,* возможен далеко не всегда. В двигателях с двухфазными последовательно соединенными обмотками и двумя шунтирующими сопротивлениями (табл. 2,*7*) фаза q шунтируется емкостью, так же как в двигателях табл. 2,*6,* а фаза d шунтируется емкостью или индуктивностью в зависимости от соотношения параметров обмоток. Это дает возможность получить уравновешенный режим двигателя при использовании реактивных сопротивлений.

В большинстве однофазных двигателей с двухфазными обмотками угол между обмотками d и q статора в пространстве составляет 90 электрических градусов. Все обмоточное пространство статора заполняется медью, мощность габарита используется наилучшим образом.

В некоторых случаях, например, в однофазных двигателях с одной рабочей емкостью или с пусковыми конденсаторами, может оказаться целесообразным применить $\Theta_q^{\text{пр}} \neq 90°$ При этом возможны ОКД с параллельным (табл. 2,*8*) и последовательным (табл. 2,*9*) включением обмоток статора.

Однофазный двигатель с экранированным полюсом (табл. 2, *10*) является частным случаем двигателей, представленных в в табл. 2,*9* при $C = \infty$.

В двигателях табл. 2,*9,б,в* $\Theta_q^{\text{пр}} > 90°$. Обмотки статора d и q занимают от $^2/_3$ до $^3/_4$ пазов и соединяются последовательно. На время пуска одна из обмоток шунтируется активным сопротивлением или емкостью, которые после разгона отключаются.

В настоящее время однофазные двигатели с конденсаторным пуском или с пусковым сопротивлением в цепи пусковой обмотки выполняются при параллельном включении главной и пусковой обмоток (табл. 2, *4, б*). После окончания разгона пусковое сопротивление и пусковая обмотка отключаются и $^1/_3$ обмотки не работает. Применение схем табл. 2,*9,б,в* дает возможность уменьшить расход меди на 33% при тех же мощности двигателя и рабочих характеристиках. Использование рабочих конденсаторов (табл. 2,*9,г*) позволяет повысить мощность двигателя примерно на 20%.

Большая часть работ по ОКД посвящена изучению двигателей с параллельным включеним обмоток. Если трехфазный двигатель включен в однофазную сеть, главная обмотка может состоять из двух фаз (занимать фазную зону, равную $^2/_3$) (табл. 2, *11,а,б*) или из одной (табл. 2, *11,в*), т. е. фазная зона главной обмотки равна $^1/_3$.

Однако двигатели, приведенные в табл. 2, *11*, имеют недостатки, главный из которых — значительное ухудшение кривой моментов третьими гармониками магнитодвижущей силы. Кроме того, мощность двигателя в однофазном режиме резко понижается.

Значительное улучшение характеристик ОКД достигается при использовании двух конденсаторных батарей (табл. 2,*12*,*13*).

Схема ОКД с последовательно-параллельным включением обмоток (табл. 2, *12*) [99] позволяет при высоких (около 0,86) коэффициентах мощности трехфазного двигателя сохранить номинальную мощность в однофазном режиме и устранить влияние третьих пространственных гармоник.

Схему ОКД по табл. 2, *15* целесообразно использовать при меньших коэффициентах мощности. При $\cos\varphi=0{,}5$ шунтирующая емкость C_c не используется и схема табл. 2, *15* преобразуется в схему табл. 2, *2 в*.

Три фазы обмотки статора могут быть включены параллельно и последовательно. Эти включения в однофазных двигателях совершенно не использовались, хотя их применение может дать значительный эффект.

ОКД с параллельным включением трех фаз (табл. 2,*14*) предложил Е. А. Грабчинский [104]. Применение двух емкостей при «опрокинутой» фазе *С* дает возможность получить диаграмму напряжений, близкую к симметричной трехфазной. В цепь фазы *С* включается также активное сопротивление, что нерационально, так как такой же эффект может быть получен при шунтировании фазы емкостью.

Как уже отмечалось, при электрификации сельского хозяйства используются однофазные трансформаторы типа ОМС, имеющие две обмотки низкого напряжения 220 *в*. При последовательном соединении вторичных обмоток и заземлении средней точки напряжение проводов относительно земли составляет 220 *в*, в то время как энергия распределяется при напряжении 440 *в*.

В качестве ОКД для сетей на 440 *в* могут быть использованы трехфазные двигатели с фазным напряжением 220 *в* и последовательным включением обмоток статора [100]. В этом случае возможны два варианта. Обмотки статора могут быть соединены так, чтобы положительные направления токов фаз совпадали (конец одной фазы присоединяется к началу другой аналогично соединению для токов нулевой последовательности), и одна из фаз шунтируется конденсаторами.

Более целесообразно последовательное соединение обмоток, при котором две фазы соединяются концами — к началам же этих фаз присоединяется емкость. Третья фаза соединяется последовательно, причем в зависимости от того, присоединяется ли третья фаза началом или концом к двум первым, двигатель вращается по или против часовой стрелки (см. табл. 2,*15*). Опи-

санные двигатели — ОКД с однократным шунтированием обмотки. По сравнению с ОКД с параллельно соединенными обмотками в них меньше влияние третьей пространственной гармоники, на конденсаторах не возникают перенапряжения при отключении двигателя от сети. Однако мощность указанных двигателей составляет 70—85% мощности двигателя в трехфазном режиме. В некоторых случаях такое использование мощности габарита недостаточно.

Используя двукратное шунтирование обмотки статора конденсаторами (см. табл. 2, *16*) можно повысить мощность однофазного двигателя до 90—93% его мощности в трехфазном режиме, причем мощность конденсаторных батарей уменьшается приблизительно в 1,5 раза.

При трехкратном шунтировании обмоток статора (см. табл. 2, *17*) еще больше повышается использование мощности габарита, так что мощность двигателя в однофазном режиме практически равна таковой в трехфазном режиме.

Однако в двигателях с трехкратным шунтированием обмоток на холостом ходу токи фаз, шунтированных рабочими емкостями, значительно превосходят номинальные. Двигатели удовлетворительно работают при нагрузках от номинальной до половинной, но на холостом ходу перегреваются значительно сильнее, чем при однократном шунтировании.

Большое значение имеют вопросы регулирования емкости при изменении нагрузки на валу. Плавное регулирование емкости связано с применением дросселей насыщения значительных размеров и мощностей, поэтому, очевидно, может оказаться рациональным ступенчатое изменение емкости, в частности, переход от трех- и двукратного шунтирования обмотки в номинальном режиме на однократное на холостом ходу; такой переход может осуществляться автоматически, при помощи простейших токовых реле.

Значительные преимущества имеет комбинация схем с параллельным и последовательным соединением обмоток. Однофазные двигатели с переключением обмоток при пуске с параллельного на последовательное соединение (см. табл. 2,*18*) создают значительные пусковые моменты при использовании активного пускового сопротивления. В однофазных двигателях с конденсаторным пуском без пусковой обмотки (см. табл. 2,*19*) при нормальной работе обмотки включаются последовательно таким образом, чтобы угол сдвига осей в пространстве оставался больше 90°. Во время пуска обмотки статора соединяются параллельно. Пространственный угол между обмотками выбирается больше 90°. В цепь одной из частей рабочей обмотки включается пусковая емкость.

Применение описанного переключения позволяет получить значительные кратности пускового момента при допустимых кратностях (в микродвигателях) пускового тока.

Специально спроектированные ОКД выполняются с двухфазными обмотками статора. Фазные зоны обмоток выбираются равными: при этом мощность двигателя понижается только на 6% по сравнению с мощностью двигателя при трехфазной обмотке статора.

Уравновешенный режим ОКД с двухфазной обмоткой статора можно получить путем подбора коэффициента мощности и числа витков фаз, выполняя обмотки несимметричными, или при симметричных обмотках путем шунтирования одной из фаз дополнительным реактивным сопротивлением.

Последний способ более приемлем, обмотка двигателя выполняется проводом одинакового сечения, уравновешенный режим можно получить также при включении на зажимы одной из обмоток реле для автоматического управления пуском.

Таким образом, и в случае специально спроектированных ОКД необходимы два шунтирующие реактивные сопротивления.

Применение трехфазных двигателей в качестве ОКД (см. табл. 2,*2, 3, 12—17*) дает возможность не только облегчить работу при проектировании и расширить номенклатуру выпускаемых двигателей, но также повысить их мощность и приспособить одни и те же двигатели для работы в однофазных сетях на 220 и 440 *в* и в трехфазных сетях на 380 *в*. Такая универсальность электрических двигателей в условиях сельского хозяйства особенно ценна. Поэтому ОКД мощностью выше 1 *квт* целесообразно получать, используя серийные трехфазные.

Двигатели мощностью до 1 *квт* очень часто используются без рабочих конденсаторов. Их целесообразно проектировать без пусковой обмотки (см. табл. 2,*9,б,в,г*). Микродвигатели с рабочими конденсаторами, предназначенные для использования в устройствах автоматики, в бытовых машинах, в медицинских аппаратах, рационально выполнять с двухфазными симметричными обмотками, как показано в табл. 2,*5,7*.

Основные типы применяемых конденсаторов [13—16]

Рабочая емкость ОКД находится в неблагоприятных условиях. Она должна долго выдерживать напряжение частоты сети, при пусках двигателя вследствие резонанса возможны кратковременные повышения напряжения конденсаторов. ОКД может длительное время работать на холостом ходу. Напряжение на конденсаторах при этом увеличивается на 15—25% по сравнению с значением при номинальной нагрузке. Если учесть отклонения напряжения сети, то напряжение на холостом ходу увеличивается на 20—30%. При параллельном включении обмоток возможны также значительные перенапряжения при отключении двигателя от сети. Поэтому в качестве рабочей емкости для ОКД двигателей необходимо применять конденсаторы, пред-

назначенные для работы в цепи переменного тока, а величину их номинального напряжения необходимо выбирать с учетом возможных и допустимых его отклонений от номинального.

В настоящее время для частоты 50—500 *гц* разработаны конденсаторы из металлизированной бумаги типа МБГЧ на номинальные напряжения 150, 250, 500 и 1000 *в* при емкости 0,25; 0,5; 1,2; 4; 10 *мкф* (табл. 3).

Таблица 3

Емкость, *мкф*	Номинальное напряжение, *в*				
	150	250	500	750	1000
	Номер корпуса конденсатора				
0,25	—	—	3	2	3а
0,5	—	1	1а	3а	6
1,0	—	3	3а	6	5
2	1	1а	6	5	—
4	3	3а	4	—	—
10	2	7	—	—	—

Размеры корпуса и веса конденсаторов таковы:

Номер корпуса	1	1а	2	3	3а	4	5	6	7
Размеры основания, *мм*	31×16	46×16	46×21	31×31	46×31	69×34	69×39	46×56	46×66
Высота конденсатора плюс высота вывода, *мм*	25+11	50+11	50+11	25+11	50+11	115+11	115+11	50+11	50+11
Вес, *кг*	0,03	0,085	0,115	0,05	0,14	0,4	0,5	0,23	0,28

Испытательное напряжение для конденсаторов типа МБГЧ, прикладываемое на время не более 10 сек., составляет 120% при номинальном напряжении, равном 150 *в*, и 130% — при других значениях номинального напряжения. Допускается работа конденсаторов при температурах от —60 до +70°С. Тангенс угла потерь не превышает 0,01. При частоте 500 *гц* номинальное напряжение конденсаторов уменьшается в два раза.

В качестве рабочей емкости могут быть использованы также «косинусные» конденсаторы типа КМ и бумажно-масляные конденсаторы феррорезонансных стабилизаторов типа СМ.

Для пуска однофазных двигателей можно применить [6, 16] неполярные электролитические конденсаторы. В настоящее время разработаны и выпускаются такие конденсаторы типа ЭП на напряжения 175 и 300 *в*, емкостью до 100 *мкф* (табл. 4). При температуре 20° С тангенс угла потерь в них не превышает 0,08.

Пусковые конденсаторы допускают работу при температурах от —40 до +60°С. При понижении температуры емкость уменьшается. Техническими условиями на конденсаторы типа ЭП при

температуре —40°С допускается снижение емкости не более чем на 50% значения при температуре +20°С.

Пусковые конденсаторы выдерживают 20 и 30 включений в час при длительности одного включения 3 сек. в течение 12 час. непрерывной работы. Допускается за 15 сек. произвести пять включений длительностью 0,75 сек. каждое. Испытательное напряжение для конденсаторов типа ЭП, прикладываемое на 3—5 сек., составляет 120% номинального.

Таблица 4

Тип конденсатора	Номинальное напряжение, *в*	Емкость, *мкф*	Допустимое количество включений в час	Диаметр основания, *мм*	Высота конденсатора плюс высота выводов, *мм*	Вес конденсатора, *кг*
ЭП-175-5	175	5	30	24	9+43+9*	0,04
ЭП-175-10	175	10	30	24	9+70+9*	0,06
ЭП-175-15	175	15	30	24	9+70+9*	0,06
ЭП-175-20	175	20	30	29	9+70+9*	0,08
ЭП-175-30	175	30	30	33	68+9	0,10
ЭП-175-50	175	50	30	33	93+9	0,13
ЭП-175-70	175	70	30	37	93+9	0,18
ЭП-175-100	175	100	20	37	117+9	0,22
ЭП-300-1,5	300	1,5	30	24	43+9	0,04
ЭП-300-3	300	3	30	24	9+70+9*	0,06
ЭП-300-5	300	5	30	29	9+70+9*	0,08
ЭП-300-8	300	8	30	33	68+9	0,10
ЭП-300-10	300	10	30	33	93+9	0,13
ЭП-300-15	300	15	20	37	93+9	0,18
ЭП-300-20	300	20	20	37	117+9	0,22
ЭП-300-30	300	30	20	43	117+9	0,28

Методы теоретического исследования однофазных двигателей

Однофазные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором рассматриваются обычно как частный предельный случай работы симметричного двигателя. Для исследования происходящих в них процессов могут применяться следующие методы: 1) неподвижных в пространстве координат, 2) двух вращающихся в противоположные стороны полей, 3) симметричных составляющих.

Метод симметричных составляющих применяется для двух- и трехфазных машин и называется соответственно методом двух и трех координат.

Сравнение этих методов на примере ОКД, приведенного в табл. 2, *11, б*, выполнено И. М. Постниковым [54].

* Выводы на обоих торцах.

Метод неподвижных в пространстве координат позволяет рассматривать переходные процессы при включении и выключении конденсаторного двигателя. Методы двух вращающихся в противоположные стороны полей и симметричных координат позволяют сравнительно просто исследовать установившиеся режимы в однофазных двигателях.

Наиболее часто для расчетов установившихся значений токов асинхронных двигателей применяется метод симметричных координат. При этом несимметричные токи и напряжения заменяются многофазными системами токов и напряжений, при действии которых машина работает в симметричном режиме.

В случае применения второго метода поле, созданное током каждой фазы, раскладывается на поля с противоположными направлениями вращения. В каждой из фаз определяются э. д. с., индуктированная каждым из $2m$ вращающихся полей, результирующая э. д. с. и напряжение сети.

Для третьего метода число составляющих полей равно числу фаз m. В этом преимущество метода симметричных координат. Последний позволяет учитывать паразитные моменты от высших гармоник магнитного поля в конденсаторных двигателях [70].

Допущения рассматриваемых методов в основном одинаковы: пренебрегается нелинейностью магнитных цепей (предполагается справедливым метод наложения) и зубчатостью воздушного зазора. Поэтому для расчета установившихся режимов наиболее рационально воспользоваться методом симметричных составляющих.

Глава II

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА СИММЕТРИЧНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОДНОФАЗНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Метод симметричных составляющих (координат) основан на том, что любое число может быть представлено в виде произвольной суммы составляющих. В электротехнике принимается, что эти числа — векторы в комплексной плоскости, изображающие электрические величины, например напряжения, токи. Рассматривая совокупность m чисел, характеризующих m-фазную систему, можно получить произвольное число разложений, из которого можно образовать совокупности составляющих, причем количество совокупностей принимается равным числу фаз.

Для двухфазных асинхронных машин токи и напряжения фаз раскладываются на составляющие прямой и обратной последовательности, для трехфазных — на составляющие нулевой, прямой и обратной последовательности.

Кроме того, эти составляющие подчиняются дополнительным условиям. Не всякое разложение может оказаться полезным. Наиболее просто анализируются процессы в асинхронных машинах при круговых вращающихся полях; поэтому составляющие токов и напряжений фаз должны удовлетворять условиям, при которых в воздушном зазоре образуются круговые вращающиеся поля.

В трехфазных машинах принимается, что составляющие прямой последовательности создают прямо вращающееся круговое поле, а составляющие обратной последовательности — обратно вращающееся круговое поле. Токи нулевой последовательности трехфазного двигателя создают пульсирующие поля. Этим учитывается метод Стоквиса [56], согласно которому токи и напряжения раскладываются на такие составляющие, которые создают в машине прямо и обратно вращающиеся и пульсирующее поля.

Фортескью, К. Ф. Вагнер и Р. Д. Эванс [57] предполагали, что токи нулевой последовательности не создают никаких полей. И. М. Камень [60] показал, что эти токи трехфазных двигателей образуют поля третьих гармоник и паразитные вращающиеся моменты, существенно искажающие механическую характеристику двигателя.

Для применения метода симметричных составляющих долгое время принималась как основное условие симметрия обмоток («приводимость» обмоток или равное вложение меди в обмотки двигателя). Ю. С. Чечет [44—48] для двухфазных машин с несимметричными обмотками, расположенными в пространстве под углом 90°, разработал метод симметричных составляющих при учете основной гармоники поля. В работах [68—70] рассмотрен метод симметричных координат для случая машин с несовпадающими обмотками при учете высших гармоник поля.

Как уже отмечалось, большое значение имеют ОКД, полученные при использовании серийных трехфазных асинхронных машин. Для изучения таких однофазных двигателей применяется метод симметричных составляющих для трехфазных симметричных машин и метод симметричных составляющих для двухфазных машин с несимметричными обмотками, расположенными в пространстве под углом 90°.

Ниже приводятся основные уравнения метода симметричных составляющих для этих двух случаев.

Метод трех координат

Основные уравнения метода симметричных составляющих записываются обычно в таком виде:

$$\dot I_A = \dot I_0 + \dot I_1 + \dot I_2, \qquad \dot U_A = \dot U_0 + U_1 + U_2, \qquad \dot U_0 = \dot I_0 Z_0,$$

$$\dot I_B = \dot I_0 + a^2 \dot I_1 + a\dot I_2, \quad \dot U_B = \dot U_0 + a^2\dot U_1 + a\dot U_2, \quad \dot U_1 = \dot I_1 Z_1,$$

$$\dot I_C = \dot I_0 + a\dot I_1 + a^2\dot I_2, \quad \dot U_C = \dot U_0 + a\dot U_1 + a^2\dot U_2, \quad \dot U_2 = \dot I_2 Z_2,$$

где

$$a = e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2},$$

$$a^2 = e^{j240^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2},$$

$\dot U_0, \dot I_0$ — напряжение и ток нулевой последовательности; $\dot U_1, \dot I_1$ — напряжение и ток прямой последовательности; $\dot U_2, \dot I_2$ — напряжение и ток обратной последовательности; Z_0, Z_1, Z_2 — сопротивление нулевой, прямой и обратной последовательности.

Известно также, что при прохождении по обмоткам токов прямой последовательности в воздушном зазоре асинхронной

машины образуется магнитное поле основной гармоники, вращающееся в положительном направлении отсчета углов (прямое поле). Токи обратной последовательности образуют обратное поле основной гармоники.

В воздушном зазоре асинхронной машины существует не только основная гармоника. Обмотки машин располагаются в пазах, число которых ограничено. При целом числе пазов на полюс и фазу и равномерном воздушном зазоре обмотка статора создает магнитное поле, содержащее ряд нечетных гармоник $\nu = 1, 3, 5, 7, 9, 11...$

Токи фаз I_A, I_B, I_C в общем случае могут быть любыми. Их составляющие должны удовлетворять таким условиям: 1) составляющие токов фаз равны по амплитуде, 2) токи прямой и обратной последовательности фаз образуют симметричные трехфазные системы, 3) токи нулевой последовательности фаз равны.

В трехфазных симметричных машинах токи прямой и обратной последовательности в воздушном зазоре не могут создавать круговых вращающихся полей гармоник, кратных трем. Токи нулевой последовательности создают в воздушном зазоре только третьи гармоники поля.

Поэтому сопротивление нулевой последовательности определяется суммой [70]

$$Z_0 = r_1 + jx_{\text{л.п.о}} + \sum_{\nu=3,9,15,21} Z_{0\nu}, \qquad (2)$$

где

$$Z_{0\nu} = \frac{jx_{m\nu}\left(\dfrac{r'_{2\nu}}{s_\nu} + jx'_{2\nu}\right)}{\dfrac{r^1_{2\nu}}{s_\nu} + j\left(x_{m\nu} + x^1_{2\nu}\right)} + \frac{jx_{m\nu}\left(\dfrac{r'_{2\nu}}{2 - s_\nu} + jx'_{2\nu}\right)}{\dfrac{r^1_{2\nu}}{2 - s_\nu} + j\left(x_{m\nu} + x^1_{2\nu}\right)}. \qquad (3)$$

Схема замещения для токов нулевой последовательности может быть представлена в виде ряда последовательно соединенных контуров намагничивающей и вторичной цепей третьих гармоник для прямого и обратного полей. Третья гармоника может рассматриваться как главная (рис. 1).

На рис. 1 представлены также схемы замещения для токов прямой и обратной последовательности в предположении, что ротор асинхронного двигателя вращается в положительном направлении (в направлении поля прямой последовательности).

Высшие гармоники поля статора обусловливают дифференциальное сопротивление, которое для токов прямой последовательности записывается в виде

$$Z_{1\text{д}} = \sum_{\nu=6n+1} Z_{1\nu} + \sum_{\nu=6n-1} Z_{2\nu}, \qquad (4)$$

а для токов обратной последовательности

$$Z_{2g} = \sum_{\nu=6n-1} Z_{1\nu} + \sum_{\nu=6n+1} Z_{2\nu}. \tag{5}$$

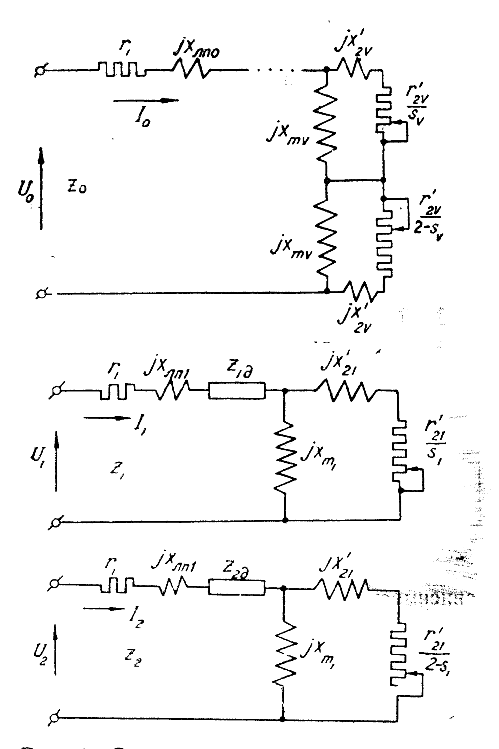


Рис. 1. Схема замещения для токов нулевой, прямой и обратной последовательности трехфазного двигателя.

При этом

$$Z_{1\nu} = \frac{jx_{m\nu}\left(\frac{r_{2\nu}^{1}}{s_\nu} + jx_{2\nu}^{1}\right)}{\frac{r_{2\nu}^{1}}{s_\nu} + j\left(x_{m\nu} + x_{2\nu}^{1}\right)}, \tag{6}$$

$$Z_{2\nu} = \frac{jx_{m\nu}\left(\frac{r_{2\nu}^{1}}{2-s_\nu} + jx_{2\nu}^{1}\right)}{\frac{r_{2\nu}^{1}}{2-s_\nu} + j\left(x_{m\nu} + x_{2\nu}^{1}\right)}. \tag{7}$$

В приведенных соотношениях параметры определяются формулами

$$r_{2\nu}^{1} = r_r \frac{m_1}{m_2}\left(\frac{w_1 k_{1\nu}}{w_2 k_{2\nu}}\right)^2, \tag{8}$$

$$x_2' = x_{r\nu} \frac{m_1}{m_2} \left(\frac{w_1 k_{1\nu}}{w_2 k_{2\nu}} \right)^2, \quad (9)$$

$$x_{m\nu} = \frac{m_1}{2} 2\pi f \mu_0 li \frac{\tau}{\delta_\nu^1} \left(\frac{2}{\pi} \right)^2 \frac{1}{\nu^2 p} (w_1 k_{1\nu})^2, \quad (10)$$

где w_1 и w_2 — числа витков в фазах статора и ротора, причем для короткозамкнутого ротора $w_2 = \frac{1}{2}$; $k_{1\nu}$ и $k_{2\nu}$ — обмоточные коэффициенты фаз статора и ротора гармоники ν; m_1 и m_2 — числа фаз статора и ротора; $r_{r\nu}$ и $x_{r\nu}$ — неприведенные сопротивления фазы ротора для гармоники ν; $r_{2\nu}'$ и $x_{2\nu}'$ — приведенные к обмотке стато-

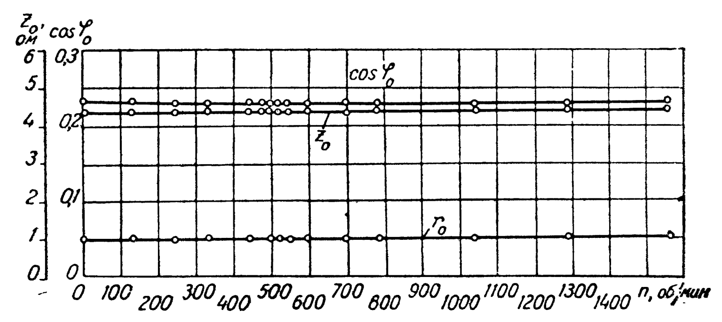


Рис. 2. Зависимости параметров нулевой последовательности асинхронного двигателя с трехфазным ротором АК 60-4.

ра сопротивления эквивалентной фазы ротора; l_i — длина ротора (в *см*); τ — полюсное деление (в *см*); $2p$ — число полюсов; δ_ν^1 — приведенный воздушный зазор (в *см*); $\mu_0 = 0{,}4\pi \cdot 10^{-8}$ *гн/см*; r_1 — активное сопротивление обмотки статора; $x_{1лп0}$, $x_{1лп1}$ — реактивные сопротивления рассеяния пазовых и лобовых частей статора для токов нулевой и прямой последовательности.

В формулах для дифференциального сопротивления $n = 1, 2, 3, 4\ldots$. Скольжение ротора относительно поля ν-той гармоники

$$s_\nu = 1 - \nu(1 - s). \quad (11)$$

Схемы замещения для токов прямой и обратной симметричных составляющих общеизвестны. Они соответствуют схемам замещения двигателя при вращении по направлению поля или против него. Схемы замещения для токов нулевой последовательности менее известны. В случае двигателя с трехфазным ротором схемы замещения для токов нулевой последовательности состоят из последовательно включенных первичного сопротивления r_1, индуктивного сопротивления рассеяния в пазовых и лобовых частях обмотки статора и взаимной индукции тре-

тьих гармоник м. д. с. Вторичные контуры отсутствуют, так как трехфазный ротор не взаимодействует с третьими гармониками. Это подтверждают испытания двигателя АК 60-4 с фазным ро-

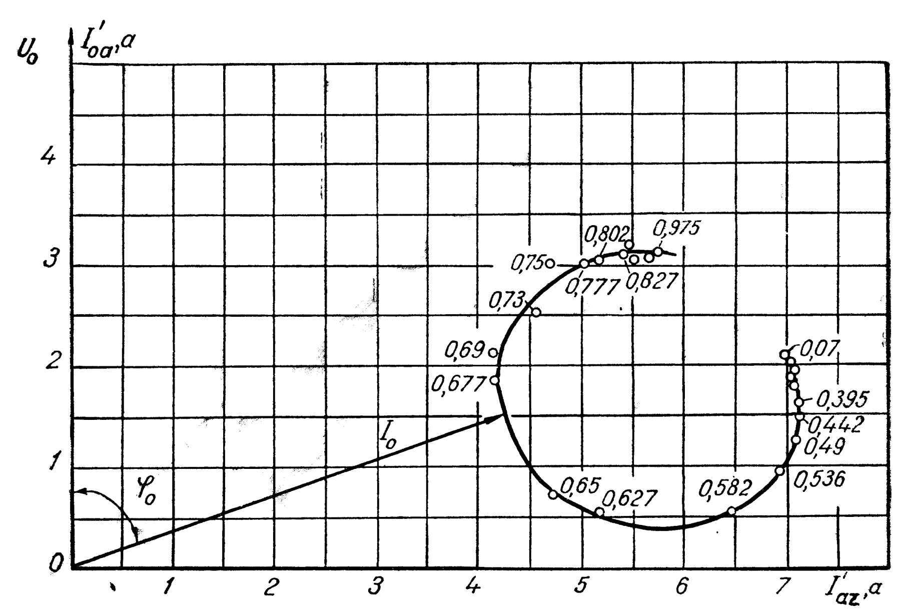


Рис. 3. Годограф тока нулевой последовательности (двигатель АОС 51-4, $3U'_0 = 120$ *в*, цифры указывают скольжечие по отношению к основной гармонике м. д. с.)

тором, результаты которых представлены на рис. 2. Для двигателя с короткозамкнутым ротором параметры Z_0, r_0, x_0 сильно зависят от скорости вращения ротора.

Как известно, для однофазного двигателя существует круговая диаграмма. Полученный экспериментально годограф тока нулевой последовательности двигателя АОС 51-4 (рис. 3) удовлетворительно приближается к кругу.

Параметры схемы замещения для токов нулевой последовательности можно определить по методике однофазных двигателей.

Моменты от токов нулевой последовательности для короткозамкнутых роторов имеют, как известно, резко выраженные максимумы при скорости $n > {}^1/_3\, n_c$ (рис. 4).

Метод двух координат

Для двухфазной асинхронной машины с несимметричными обмотками, сдвинутыми в пространстве на 90°, напряжения и токи фаз раскладываются на составляющие по соотношениям

$$\dot{U}_d = \dot{U}_{d1} + \dot{U}_{d2}, \quad \dot{I}_d = \dot{I}_{d1} + \dot{I}_{d2}, \quad \dot{U}_q = \dot{U}_{q1} + \dot{U}_{q2},$$
$$\dot{I}_q = \dot{I}_{q1} + \dot{I}_{q2}, \quad \dot{U}_{d1} = \dot{I}_{d1} Z_{d1}, \quad \dot{U}_{q1} = \dot{I}_{q1} Z_{q1}, \tag{12}$$
$$\dot{U}_{d2} = \dot{I}_{d2} Z_{d2}, \quad \dot{U}_{q2} = \dot{I}_{q2} Z_{q2}.$$

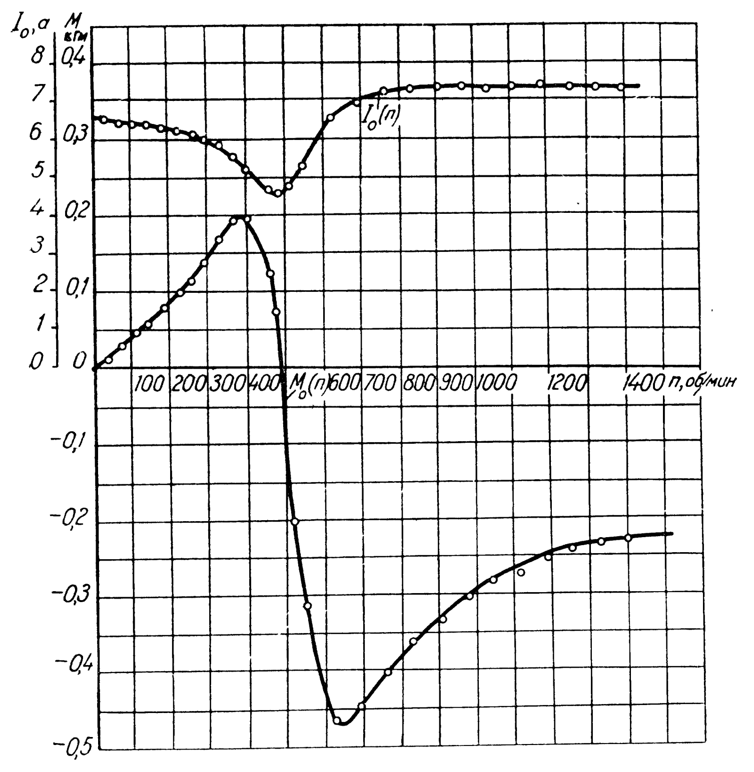


Рис. 4. Зависимость токов и моментов нулевой последовательности от скорости вращения ротора (двигатель АОС 51-4, $3U_0=120$ *в*).

Составляющие токов прямой последовательности при этом должны удовлетворять условиям образования прямо вращающегося кругового поля

$$\dot{I}_{q1} w_q k_{q1} = -j \dot{I}_{d1} w_d k_{d1}. \tag{13}$$

Аналогично составляющие токов обратной последовательности должны удовлетворять условиям образования обратно вращающегося поля

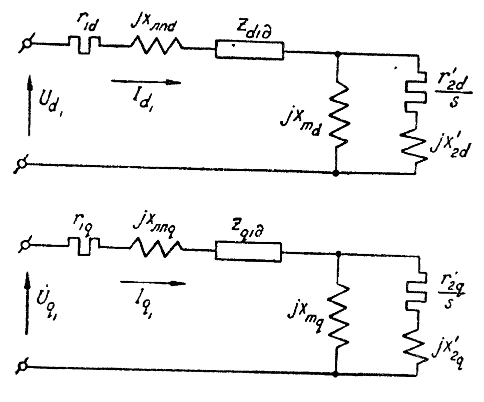
$$I_{q2} w_q k_{q1} = j I_{d2} w_d k_{d1}. \tag{14}$$

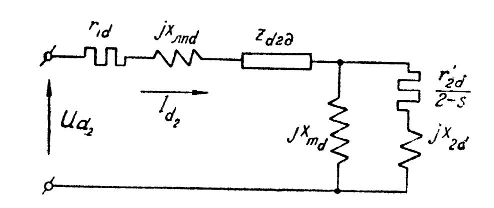
В последних уравнениях w_d, k_{d1}, w_q, κ_{q1}—числа витков и обмоточные коэффициенты фаз d и q для первой гармоники.

Полученные на основании уравнений (12)—(14) составляющие являются составляющими для первой основной гармоники.

Схемы замещения для токов прямой и обратной составляющих двухфазного несимметричного двигателя приведены на рис. 5.

На приведенных схемах r_{1d}, r_{1q} — активные сопротивления первичных обмоток фаз d и q; $x_{\text{лпd}}$, $x_{\text{лпq}}$ — реактивные сопротивления рассеяния пазовых и лобовых частей обмоток d и q статора; $z_{d1\text{д}}$, $z_{d2\text{д}}$, $z_{q1\text{д}}$, $z_{q2\text{д}}$ — дифференциальные сопротивления для токов прямой и обратной последовательности фаз d и q статора.





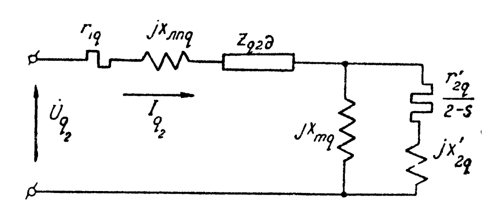


Рис. 5. Схемы замещения для токов прямой и обратной последовательности фаз d и q.

Дифференциальное сопротивление для тока прямой последовательности фазы d определяется соотношением

$$Z_{d1\text{д}} = \sum_{\nu \neq 1} Z_{d1\nu}. \qquad (15)$$

Для тока обратной последовательности фазы d дифференциальное сопротивление

$$z_{d2\text{д}} = \sum_{\nu \neq 1} Z_{d2\nu}. \qquad (16)$$

Для фазы q имеем аналогичные соотношения

$$Z_{q1\text{д}} = \sum_{\nu \neq 1} Z_{q1\nu}, \qquad (17)$$

$$Z_{q2\text{д}} = \sum_{\nu \neq 1} Z_{q2\nu}. \qquad (18)$$

В соотношениях (15)—(18) суммирование составляющих сопротивлений ведется по всем высшим гармоникам за исключением первой, которая принимается за основную.

При этом сопротивления, обусловленные одной высшей гармоникой порядка υ, могут быть определены соотношениями [70].

$$Z_{d11^\nu} = Z_{d1^\nu}\frac{1-\frac{k_{d1}k_{q^\nu}}{k_{d^\nu}k_{q1}}j^{-(\nu+1)}}{2}+Z_{d2^\nu}\frac{1-\frac{k_{d1}k_{q^\nu}}{k_{d^\nu}k_{q1}}j^{(\nu-1)}}{2}, \quad (19)$$

$$Z_{q11^\nu} = Z_{q1^\nu}\frac{1-\frac{k_{d^\nu}k_{q1}}{k_{d1}k_{q^\nu}}j^{(\nu+1)}}{2}+Z_{q2^\nu}\frac{1-\frac{k_{d^\nu}k_{q1}}{k_{d1}k_{q^\nu}}j^{-(\nu-1)}}{2}, \quad (20)$$

$$Z_{d21^\nu} = Z_{d1^\nu}\frac{1-\frac{k_{d1}k_{q^\nu}}{k_{d^\nu}k_{q1}}j^{-(\nu-1)}}{2}+Z_{d2^\nu}\frac{1-\frac{k_{d1}k_{q^\nu}}{k_{d^\nu}k_{q1}}j^{(\nu+1)}}{2}, \quad (21)$$

$$Z_{q21^\nu} = Z_{q1^\nu}\frac{1-\frac{k_{d^\nu}k_{q1}}{k_{d1}k_{q^\nu}}j^{(\nu-1)}}{2}+Z_{q2^\nu}\frac{1-\frac{k_{d^\nu}k_{q1}}{k_{d1}k_{q^\nu}}j^{-(\nu+1)}}{2}. \quad (22)$$

Соотношения (19)—(22) справедливы для двухфазных несимметричных двигателей при сдвиге обмоток на 90°, когда поле содержит ряд нечетных гармоник.

Двухфазные машины, у которых $\Theta_q^{\text{пр}} = \frac{\pi}{2}$, имеют, как правило, полностью обмотанный статор. Обмотки фаз d и q имеют один и тот же шаг y, а сумма относительных значений фазных зон равна единице. Обмоточный коэффициент фазы d для любой гармоники может быть записан в таком виде:

$$k_{d^\nu} = \frac{\sin\lambda_d\nu\frac{\pi}{2}}{Q\lambda_d\sin\nu\frac{\pi}{2Q}}\sin\nu\frac{\pi y}{2\tau}. \quad (23)$$

Обмоточный коэффициент фазы q

$$k_{q^\nu} = \frac{\sin\lambda_q\nu\frac{\pi}{2}}{Q\lambda_q\sin\nu\frac{\pi}{2Q}}\sin\nu\frac{\pi y}{2\tau}. \quad (24)$$

Отношение обмоточных коэффициентов фаз d и q для ν-ой гармоники

$$\frac{k_{d^\nu}}{k_{q^\nu}} = \frac{\sin\lambda_d\nu\frac{\pi}{2}}{\sin(1-\lambda_d)\nu\frac{\pi}{2}}\cdot\frac{1-\lambda_d}{\lambda_d}.$$

Произведение отношений обмоточных коэффициентов

$$\frac{k_{d\nu}}{k_{q\nu}} \cdot \frac{k_{q1}}{k_{d1}} = \frac{\sin \lambda_d \nu \frac{\pi}{2} \sin (1 - \lambda_d) \frac{\pi}{2}}{\sin (1 - \lambda_d) \nu \frac{\pi}{2} \sin \lambda_d \frac{\pi}{2}}.$$

Если ν — нечетное число, то

$$\frac{k_{d\nu}}{k_{q\nu}} \cdot \frac{k_{q1}}{k_{d1}} = \sin \nu \frac{\pi}{2} \frac{\operatorname{tg} \lambda_d \nu \frac{\pi}{2}}{\operatorname{tg} \lambda_d \frac{\pi}{2}}$$

Величина $\sin \nu \frac{\pi}{2} = \pm 1$ при нечетных значениях ν может быть выражена через

$$\sin \nu \frac{\pi}{2} = j^{\nu - 1} \quad \text{при } \nu = 1, 3, 5, 7 \ldots.$$

Тогда

$$\frac{k_{d\nu}}{k_{q\nu}} \frac{k_{q1}}{k_{d1}} = j^{\nu - 1} \frac{\operatorname{tg} \lambda_d \nu \frac{\pi}{2}}{\operatorname{tg} \lambda_d \frac{\pi}{2}}. \tag{25}$$

Подставим полученные значения обмоточных коэффициентов в формулы для сопротивлений первичной цепи, обусловленных наличием ν-ой гармоники м. д. с.,

$$Z_{d11\nu} = \frac{Z_{d1\nu} + Z_{d2\nu}}{2} + j^{-(\nu+1)}\, j^{-\nu+1} \frac{\operatorname{tg} \lambda_d \frac{\pi}{2}}{\operatorname{tg} \lambda_d \nu \frac{\pi}{2}} \cdot \frac{Z_{d2\nu} - Z_{d1\nu}}{2}.$$

Но

$$j^{-(\nu+1)}\, j^{-\nu+1} = j^{-2\nu} = (-1)^{\nu} = -1,$$

поэтому

$$Z_{d11\nu} = \frac{1}{2} Z_{d1\nu} \left(1 + \frac{\operatorname{tg} \lambda_d \frac{\pi}{2}}{\operatorname{tg} \lambda_d \nu \frac{\pi}{2}} \right) + \frac{1}{2} Z_{d2\nu} \left(1 - \frac{\operatorname{tg} \lambda_d \frac{\pi}{2}}{\operatorname{tg} \lambda_d \nu \frac{\pi}{2}} \right). \tag{26}$$

В соотношении для $z_{d21\nu}$ имеем

$$j^{-(\nu-1)}\, j^{-(\nu-1)} = j^{-2\nu+2} = (-1)^{\nu-1} = 1$$

и

$$Z_{d21\nu} = \frac{1}{2} Z_{d1\nu} \left(1 - \frac{\operatorname{tg} \lambda_d \frac{\pi}{2}}{\operatorname{tg} \lambda_d \nu \frac{\pi}{2}} \right) + \frac{1}{2} Z_{d2\nu} \left(1 + \frac{\operatorname{tg} \lambda_d \frac{\pi}{2}}{\operatorname{tg} \lambda_d \nu \frac{\pi}{2}} \right). \tag{27}$$

После аналогичных преобразований находим для $Z_{q11^{\nu}}$ и $Z_{q21^{\nu}}$ выражения

$$Z_{q11^{\nu}} = \frac{1}{2} Z_{q1^{\nu}} \left(1 + \frac{\operatorname{tg} \nu\lambda_d \frac{\pi}{2}}{\operatorname{tg} \lambda_d \frac{\pi}{2}} \right) + \frac{1}{2} Z_{q2^{\nu}} \left(1 - \frac{\operatorname{tg} \nu\lambda_d \frac{\pi}{2}}{\operatorname{tg} \lambda_d \frac{\pi}{2}} \right), \tag{28}$$

$$Z_{q21^{\nu}} = \frac{1}{2} Z_{q1^{\nu}} \left(1 - \frac{\operatorname{tg} \nu\lambda_d \frac{\pi}{2}}{\operatorname{tg} \lambda_d \frac{\pi}{2}} \right) + \frac{1}{2} Z_{q2^{\nu}} \left(1 + \frac{\operatorname{tg} \nu\lambda_d \frac{\pi}{2}}{\operatorname{tg} \nu\lambda_d \frac{\pi}{2}} \right). \tag{29}$$

Суммируя вносимое сопротивление для всех гармоник $\nu \neq 1$, можно получить точное значение дифференциального рассеяния с учетом экранирующего действия вторичного контура.

В некоторых случаях дифференциальное сопротивление можно определить только через сопротивление взаимной индукции ν-ой гармоники, пренебрегая ослабляющим действием ротора. Для этого в уравнениях (6), (7) нужно принять $r^1_{2\nu} = \infty$ [79]. Тогда

$$Z_{d1^{\nu}} = Z_{d2^{\nu}} = jx_{md^{\nu}}, \tag{30}$$

$$Z_{q1^{\nu}} = Z_{q2^{\nu}} = jx_{mq^{\nu}}. \tag{31}$$

Подставляя эти значения эквивалентных сопротивлений в соотношения (26) и (27), находим

$$Z_{d11^{\nu}} = jx_{md^{\nu}} = Z_{d21^{\nu}}, \tag{32}$$

$$Z_{q11^{\nu}} = jx_{mq^{\nu}} = Z_{q21^{\nu}}. \tag{33}$$

Это означает, что, пренебрегая экранирующим действием ротора на величину дифференциального рассеяния, мы можем пользоваться одними и теми же значениями первичных параметров схем замещения для токов прямой и обратной последовательности рассматриваемой фазы. При учете ослабляющего действия ротора необходимо для каждой последовательности определять параметры первичной цепи замещения.

Дифференциальное сопротивление, которое при таком допущении чисто реактивное, определяется суммированием рядов, аналогичного суммированию для трехфазных машин [79, 80].

Для фазы d

$$Z_{d1\text{д}} = jx_{d1\text{д}} = jx_{md1} \sum_{\nu \neq 1} \left(\frac{k_{d^{\nu}}}{k_{d1}} \cdot \frac{1}{\nu} \right)^2 \frac{\delta^1}{\delta^1_{\nu}}, \tag{34}$$

для фазы q

$$Z_{q1\text{д}} = jx_{q1\text{д}} = jx_{mq1} \sum_{\nu \neq 1} \left(\frac{k_{q^{\nu}}}{k_{q1}} \cdot \frac{1}{\nu} \right)^2 \frac{\delta^1}{\delta^1_{\nu}}. \tag{35}$$

Принимая, что эквивалентные воздушные зазоры для ν-ой и первой гармоник равны между собой, и подставляя значение обмоточных коэффициентов, получим, что для нахождения дифференциального сопротивления несимметричной машины необходимо суммировать ряды по формулам

$$x_{d1д} = x_{md1} \sum_{\nu \neq 1} \left(\frac{\sin \lambda_d \nu \frac{\pi}{2}}{\sin \lambda_d \frac{\pi}{2}} \cdot \frac{\sin \nu \frac{\pi y}{2\tau}}{\sin \frac{\pi y}{2\tau}} \cdot \frac{\sin \frac{\pi}{2Q}}{\sin \frac{\nu\pi}{2Q}} \frac{1}{\nu} \right)^2, \quad (36)$$

$$x_{q1д} = x_{mq1} \sum_{\nu \neq 1} \left(\frac{\sin \lambda_q \nu \frac{\pi}{2}}{\sin \lambda_q \frac{\pi}{2}} \cdot \frac{\sin \nu \frac{\pi y}{2}}{\sin \frac{\pi y}{2\tau}} \cdot \frac{\sin \frac{\pi}{2Q}}{\sin \frac{\nu\pi}{2Q}} \cdot \frac{1}{\nu} \right)^2. \quad (37)$$

Таким образом, для нахождения дифференциальных сопротивлений обмоток статора двухфазного двигателя необходимо выполнить суммирование рядов типа

$$\sum_{\nu \neq 1}^{\infty} \left(\frac{k_{d\nu}}{\nu} \right)^2 \text{ и } \sum_{\nu \neq 1}^{\infty} \left(\frac{k_{q\nu}}{\nu} \right)^2.$$

Для симметричных двух-, трех- и многофазных обмоток эти суммы уже определены [58, 79, 80]. Дифференциальное сопротивление симметричных обмоток при дробном числе пазов на полюс и фазу определено в работе [81].

Для несимметричных машин эта величина еще не найдена. Трудность здесь состоит в том, что при изменении фазных зон обмоток направление вращения отдельных гармоник изменяется. В первом приближении суммы рядов могут быть определены по методу Крона и Боппа [82].

Обмоточный коэффициент повторяет свои значения по достижении порядкового номера гармоники $\nu = T$. При известном T сумма ряда определяется соотношением

$$\sum_{1}^{\infty} \left(\frac{k_{d\nu}}{\nu} \right)^2 = \left(\frac{\pi}{T} \right)^2 \left[\frac{k_{d_1}^2}{\sin^2 \frac{\pi}{T}} + \frac{k_{d_2}^2}{\sin^2 2\frac{\pi}{T}} + \ldots + \frac{k_{d\ T/2}^2}{\sin^2 \frac{\pi}{2}} \right]. \quad (38)$$

Вычитая из этой суммы $(k_{d_1})^2$, находим коэффициент дифференциального рассеяния.

Период T функции обмоточного коэффициента равен числу пазов, приходящихся на пару полюсов [82, 83], и не зависит от ширины фазной зоны обмоток d и q. В то же время величина обмоточных коэффициентов зависит от ширины фазной зоны.

Поэтому величины коэффициента дифференциального рассеяния для обмоток d и q в общем случае различны

$$\sigma_{дd} = \frac{1}{k_{d_1}^2}\left(\frac{\pi}{T}\right)^2\left[\frac{k_{d_1}^2}{\sin^2\frac{\pi}{T}} + \frac{k_{d2}^2}{\sin^2 2\frac{\pi}{T}} + \ldots + \frac{k_{d\,T/2}^2}{\sin^2\frac{\pi}{2}}\right] - 1, \quad (39)$$

$$\sigma_{дq} = \frac{1}{k_{q_1}^2}\left(\frac{\pi}{T}\right)^2\left[\frac{k_{q_1}^2}{\sin^2\frac{\pi}{T}} + \frac{k_{q_2}^2}{\sin^2 2\frac{\pi}{T}} + \ldots + \frac{k_{d\,T/2}^2}{\sin^2\frac{\pi}{2}}\right] - 1, \quad (40)$$

$$x_{1дd} = x_{md_1}\sigma_{дd},$$

$$x_{1дq} = x_{mq_1}\sigma_{дq}. \quad (41)$$

Приведенные соотношения позволяют в значительной мере сократить вычислительные работы при определении сопротивления дифференциального рассеяния.

При определении коэффициентов $\sigma_{дd}$ и $\sigma_{дq}$ по соотношениям (39), (40) необходимо находить разность примерно равных чисел, что вызывает неточности в вычислениях.

Поэтому для вычисления коэффициентов дифференциального рассеяния обмоток d и q целесообразнее пользоваться такими соотношениями:

$$\sigma_{дd} = \frac{1}{k_{d_1}^2}\left\{\left[\left(\frac{\pi}{T}\right)^2\frac{1}{\sin^2\frac{\pi}{T}} - 1\right]k_{d_1}^2 + \left[\left(\frac{\pi}{T}\right)^2\frac{1}{\sin^2 3\frac{\pi}{T}}\right]k_{d_3}^2 + \right.$$

$$\left. + \left[\left(\frac{\pi}{T}\right)^2\frac{1}{\sin^2 5\frac{\pi}{T}}\right]k_{d_5}^2 + \ldots + \left[\left(\frac{\pi}{T}\right)^2\frac{1}{\sin^2\frac{\pi}{2}}\right]k_{d\,T/2}^2\right\}.$$

Выражение для $\sigma_{дq}$ получают, заменив индекс d на q. Рассчитаем коэффициент дифференциального рассеяния для двигателя МА 93-41/4К, у которого $Z_1 = 48$; $2p = 4$; $Q = 12$; $T = 2Q = 24$; $q = 6$; $y = \frac{9}{12} = 0{,}75$;

$$\lambda_d = \lambda_q = 1/2.$$

Обмоточные коэффициенты для ряда гармоник таковы:

ν	1	3	5	7	9	11	13
κ_ν	+0,835	−0,1178	0,0742	−0,137	−0,117	+0,0455	−0,0455
ν	15	17	19	21	23	25	
κ_ν	+0,117	+0,137	−0,0742	+0,117	−0,835	+0,835	

Находим

$$\sigma_д = \frac{1}{0{,}835^2}\left\{\left[\left(\frac{\pi}{24\cdot 0{,}1305}\right)^2 - 1\right]0{,}835^2 + \left[\left(\frac{\pi}{24\cdot 0{,}383}\right)^2\right]0{,}1178^2 + \right.$$

$$+ \left(\frac{\pi}{24}\cdot\frac{1}{0{,}608}\right)^2\cdot 0{,}0742^2 + \left(\frac{\pi\cdot 0{,}137}{24\cdot 0{,}793}\right)^2 + \left(\frac{\pi\cdot 0{,}117}{24\cdot 0{,}924}\right)^2 +$$

$$\left. + \left(\frac{\pi\cdot 0{,}0455}{24\cdot 0{,}991}\right)^2\right\} = \frac{1}{0{,}835^2}(0{,}00568 + 0{,}00162 + 0{,}000255 +$$

$$+ 0{,}000512 + 0{,}000276 + 0{,}0000361) = 0{,}012,$$

что совпадает с данными, приведенными в работе [80], для двухфазных машин. Однако суммирование на основании соотношений (39), (40) не учитывает многих важных факторов, таких как зубчатость, протекание тока по проводникам, имеющим конечные размеры, наличие ротора.

Точные значения для дифференциальных сопротивлений позволяют установить направление вращения любой гармоники в симметричном двигателе. В табл. 5 приведены значения составляющих сопротивления для токов и фаз нескольких гармоник.

Из табл. 5 следует, что для тока прямой последовательности третья гармоника входит со скольжением $2 - s_3$, в то время как пятая — со скольжением вторичного контура s_5. Третья гармоника вращается против прямого поля, тогда как пятая — в направлении прямого поля.

Для двигателя с $\lambda_d = \frac{1}{3}$ и $\lambda_q = \frac{2}{3}$ значения составляющих дифференциального сопротивления для ряда гармоник могут быть определены по табл. 6. Сопротивление фазы d, сбусловленное наличием третьей пространственной гармоники, равно полусумме сопротивлений для прямой и обратной составляющих. Это вызывается тем, что фаза q не создает м. д. с. третьей гармоники. Поле третьей гармоники пульсирующее.

Пятая гармоника в схему замещения для токов прямой последовательности входит со скольжением $2 - s_5$ и вращается против прямого поля. Нетрудно видеть, что против поля вращаются также гармоника $\nu = 5$, 11, 17.

Данные табл. 5 и 6 совпадают с известными соотношениями, определяющими направления вращения гармоник в двух- и трехфазных машинах, $2mk\pm$

Метод двух вращающихся в противоположные стороны полей

Однофазные асинхронные двигатели с одной обмоткой на статоре обычно исследуются при помощи метода двух вращающихся в противоположные стороны полей [61, т. IV, стр. 76].

Таблица 5

Составляющая	Значение ν: 3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25
$Z_{d1д}$	$Z_{d2,3}$	$Z_{d1,5}$	$Z_{d2,7}$	$Z_{d_1,9}$	$Z_{d2,11}$	$Z_{d1,13}$	$Z_{d2,15}$	$Z_{d1,17}$	$Z_{d2,19}$	$Z_{d1,21}$	$Z_{d2,23}$	$Z_{d1,25}$
$Z_{d2д}$	$Z_{d1,3}$	$Z_{d2,5}$	$Z_{d1,7}$	$Z_{d2,9}$	$Z_{d1,11}$	$Z_{d2,13}$	$Z_{d1,15}$	$Z_{d2,17}$	$Z_{d1,19}$	$Z_{d2,21}$	$Z_{d1,23}$	$Z_{d2,25}$
$Z_{q1д}$	$Z_{q2,3}$	$Z_{q1,5}$	$Z_{q2,7}$	$Z_{q1,9}$	$Z_{q2,11}$	$Z_{q1,13}$	$Z_{q2,15}$	$Z_{q1,17}$	$Z_{q2,19}$	$Z_{q1,21}$	$Z_{q2,23}$	$Z_{q1,25}$
$Z_{q2д}$	$Z_{q1,3}$	$Z_{q2,5}$	$Z_{q1,7}$	$Z_{q2,9}$	$Z_{q1,11}$	$Z_{q2,13}$	$Z_{q1,15}$	$Z_{q2,17}$	$Z_{q1,19}$	$Z_{q2,21}$	$Z_{q1,23}$	$Z_{q2,25}$

Таблица 6

Величина		Значение ν: 3	5	7	9	11	13	15
$\frac{k_{d1}k_{q\nu}}{k_{q1}k_{d\nu}}$		0	−1	−1	0	+1	+1	0
Составляющие	$Z_{d1д}$	$\frac{Z_{d1,3}+Z_{d2,3}}{2}$	$Z_{d2,5}$	$Z_{d1,7}$	$\frac{Z_{d1,9}+Z_{d2,9}}{2}$	$Z_{d2,11}$	$Z_{d1,13}$	$\frac{Z_{d1,15}+Z_{d2,15}}{2}$
	$Z_{d2д}$	$\frac{Z_{d1,3}+Z_{d2,3}}{2}$	$Z_{d1,5}$	$Z_{d2,7}$	$\frac{Z_{d1,9}+Z_{d2,9}}{2}$	$Z_{a1,11}$	$Z_{d2,13}$	$\frac{Z_{d1,15}+Z_{d2,15}}{2}$
$\frac{k_{q1}k_{d\nu}}{k_{d1}k_{q\nu}}$		∞	−1	−1	∞	+1	+1	∞
Составляющие	$Z_{q1д}$	0	$Z_{q2,5}$	$Z_{q1,7}$	0	$Z_{q2,11}$	$Z_{q1,13}$	0
	$Z_{q2д}$	0	$Z_{q1,5}$	$Z_{q2,7}$	0	$Z_{q1,11}$	$Z_{q2,13}$	0

Напряжение сети, прикладываемое к обмотке статора, уравновешивается э. д. с., индуктированными прямым и обратным полями любой гармоники статора

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 (r_1 + jx_{лп1}) + \sum_{\nu=1} (\dot{E}_{пр\nu} + \dot{E}_{об\nu}). \qquad (42)$$

При этом

$$\dot{E}_{пр\nu} = jx_m\,(\dot{I}_1 + \dot{I}^1_{2\nu пр}),$$

$$\dot{E}_{об\nu} = jx_{m\nu}\,(\dot{I}_1 + \dot{I}^1_{2\nu об}). \qquad (43)$$

Уравнения роторной цепи при вращении ротора в направлении прямого поля со скольжением s_ν относительно поля ν-ой гармоники записываются в виде

$$(r^1_{2\nu} + js_\nu x^1_{2\nu})\dot{I}^1_{2\nu пр} + js_\nu x_{m\nu}\,(\dot{I}_1 + \dot{I}^1_{2\nu пр}) = 0,$$

$$[r^1_{2\nu} + j\,(2 - s\,)x^1_{2\nu}]\dot{I}^1_{2\nu об} + j\,(2 - s_\nu)\,(\dot{I}_1 + \dot{I}^1_{2\nu об}) = 0. \qquad (44)$$

Приведенные значения токов и сопротивлений роторных цепей определяются из условий равенства м. д. с., потерь и реак-

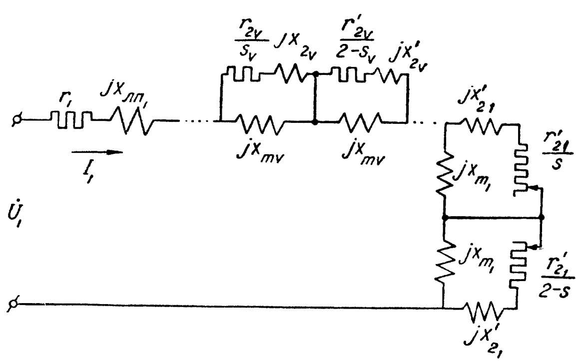


Рис. 6. Схемы замещения однофазного двигателя с короткозамкнутым ротором.

тивной мощности действительной и приведенной обмоток ротора. Формулы такого приведения общеизвестны для случая, когда число фаз обмотки статора m_1. Эти же формулы справедливы и для однофазного двигателя, если $m_1 = 1$. Схема замещения однофазного двигателя представлена на рис. 6.

Асинхронный момент, создаваемый ν-ой гармоникой однофазного двигателя, равен разности моментов от прямого и обратного полей и записывается в виде

$$M_\nu = \frac{\nu p}{2\pi f} I_1^2 \left[\frac{x^2_{m\nu}\dfrac{r^1_{2\nu}}{s_\nu}}{\left(\dfrac{r^1_{2\nu}}{s_\nu}\right)^2 + (x^1_{2\nu} + x_{m\nu})^2} - \frac{x^2_{m\nu}\dfrac{r^1_{2\nu}}{2 - s_\nu}}{\left(\dfrac{r^1_{2\nu}}{2 - s_\nu}\right)^2 + (x^1_{2\nu} + x_{m\nu})^2} \right]. \qquad (45)$$

При этом все параметры схемы замещения определяются по соотношениям (8)—(10) при $m_1 = 1$. Для токов нулевой последовательности параметры схемы замещения определяются по этим же соотношениям при $m_1 = 3$.

Схемы замещения, показанные на рис. 1 и 6, различаются тем, что токи нулевой последовательности симметричных трехфазных двигателей создают поля только третьих гармоник и в схеме замещения, приведенной на рис. 1, ν может принимать такие значения:

$\nu=3, 9, 15, 21...$, а в схеме замещения однофазного двигателя $\nu=1, 3, 5, 7, 9...$

Соотношение параметров схем замещения трех-, двух- и однофазных двигателей

Трехфазный асинхронный двигатель, включенный на однофазную сеть по схеме рис. 7, может быть исследован тремя приведенными выше методами.

Обмотка статора трехфазная, симметричная, поэтому машину можно рассматривать как трехфазную. Можно также представить эту машину двухфазной с $\Theta_q^{пр}=\frac{\pi}{2}$ и несимметричными обмотками и анализировать ее на основании метода двух координат.

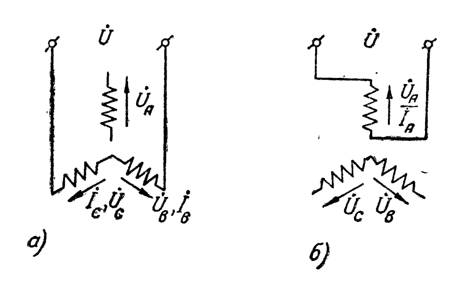


Рис. 7. Схемы однофазных двигателей: *а*—фазная зона обмотки, $\lambda=2/3$, *б*—фазная зона обмотки, $\lambda=1/3$.

В то же время она однофазная, и можно применить метод двух вращающихся полей. Естественно ожидать, что все три метода должны дать одни и те же результаты.

Однако в литературе [29, 30, 38, 59, 60, 63] на этот счет имеются противоречивые высказывания.

И. М. Камень [38, 59] рекомендует для рассматриваемой машины применять метод трех координат. Согласно Ю. С. Чечету [44], в данном случае можно применить метод двух координат.

Затруднения в выборе метода расчета особенно ощутимы, когда фазная зона включенной обмотки равна 60°. Для этого случая уже известно влияние третьей пространственной гармоники, учитываемой введением токов нулевой последовательности при использовании метода трех координат. Решение вопроса, поставленного Каде [63], какой метод более правилен, требует определения соотношений между параметрами схем замещения трех-, двух- и однофазных двигателей.

Рассмотрим двигатель, число полюсов обмотки которого равно $2p$, обмоточный шаг—y. Параметры ротора и воздушного зазора остаются постоянными. Число фаз и фазные зоны обмоток статора изменяются.

Число витков в обмотке статора может быть выражено для рассматриваемого случая через ширину фазной зоны

$$w_d = q_d p s_n \frac{1}{a} = \frac{\lambda_d Q p s_n}{a} = \frac{\lambda_d Z_1 s_n}{2a}, \qquad (46)$$

где s_n — число проводов в пазу; a — число параллельных ветвей в фазе; Z_1 — число пазов статора; $Q = \frac{Z_1}{2p}$, $\lambda_d = \frac{q_d}{Q}$ — относительное значение фазной зоны обложки d.

Пользуясь (23), находим эффективное число витков обмотки для гармоники ν

$$w_d k_{d\nu} = \frac{p s_n}{a} \cdot \frac{\sin \lambda_{d\nu} \frac{\pi}{2}}{\sin \frac{\nu\pi}{2Q}} \sin \frac{\nu \pi y}{2\tau}. \qquad (47)$$

Оно изменяется по синусоидальному закону как функция аргумента λ_d.

Поэтому отношение параметров вторичных и намагничивающей цепей двух обмоток, отличающихся числом фаз и шириной фазной зоны, определяется соотношением

$$\frac{r^{1}_{2\nu}}{r^{1э}_{2\nu}} = \frac{x^{1}_{2\nu}}{x^{1э}_{2\nu}} = \frac{x_{m\nu}}{x^{э}_{m\nu}} = \frac{m_1}{m^{э}_1} \cdot \frac{\sin \lambda_d \nu \frac{\pi}{2}}{\sin \lambda^{э}_d \nu \frac{\pi}{2}}. \qquad (48)$$

При одной и той же ширине фазной зоны параметры $r^{1}_{2\nu}$, $x^{1}_{2\nu}$, $x_{m\nu}$ схем замещения относятся как числа фаз.

Принимая параметры трехфазного двигателя за эталонные $\lambda^{э}_d = \frac{1}{3}$, $m^{э}_1 = 3$, находим отношения параметров схем замещения трех-

Таблица 7

Порядок гармоник ν	Отношение параметров схем замещения						
	$m_1=3$, $\lambda=\frac{1}{3}$	$m_1=2$			$m_1=1$		
		$\lambda=\frac{1}{3}$	$\lambda=\frac{1}{2}$	$\lambda=\frac{2}{3}$	$\lambda=\frac{1}{3}$	$\lambda=\frac{1}{2}$	$\lambda=\frac{2}{3}$
1	1	2/3	4/3	2	1/3	2/3	1
3	1	2/3	1/3	0	1/3	1/6	0
5	1	2/3	4/3	2	1/3	2/3	1
7	1	2/3	4/3	2	1/3	2/3	1
9	1	2/3	1/3	0	1/3	1/6	0
11	1	2/3	4/3	2	1/3	2/3	1
13	1	2/3	4/3	2	1/3	2/3	1
15	1	2/3	1/3	0	1/3	2/3	0

двух- и однофазного двигателей для обмоток с фазными зонами $\nu = \frac{1}{3}, \frac{2}{3}$ и $\frac{1}{2}$, приведенные в табл. 7

Эти данные показывают, что параметры обмотки с $\lambda = {}^2/_3$ у двухфазного двигателя в два раза больше, чем трехфазного.

Параметры двухфазного симметричного двигателя для гармоник, не кратных трем, равны

$$Z^{m=2} = \frac{4}{3} Z^{m=3}.$$

Эквивалентность методов трех и двух координат и метода двух вращающихся полей

Рассмотрим основные соотношения однофазного двигателя при включении на сеть двух фаз трехфазной обмотки (см. рис. 7, *а*).

На основании метода трех координат имеем

$$U_0 = I_0 = 0,\ \dot{I}_1 = \frac{a - a^2}{3} \dot{I}_B,\quad \dot{I}_2 = -\frac{a - a^2}{3} \dot{I}_B,$$

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}}{Z_1 + Z_2},\quad |\dot{I}_1| = \left|\frac{\dot{I}_B}{\sqrt{3}}\right|,\ |\dot{I}_2| = \left|\frac{\dot{I}_B}{\sqrt{3}}\right|.$$

Величина момента двигателя, развиваемого первой гармоникой, по методу трех координат

$$M''' = \frac{3p}{2\pi f} \frac{I_B^2}{3} R_э^{m=3},$$

где

$$R_э^{m=} = \left[\frac{x_m^2 \frac{r_2^1}{s}}{\left(\frac{r_2^1}{s}\right)^2 + (x_m + x_2^1)^2} - \frac{x_m^2 \frac{r_2^1}{2-s}}{\left(\frac{r_2^1}{2-s}\right)^2 + (x_m + x_2^1)^2}\right]_{m=3}.$$

Рассмотрим далее это же включение на основании метода двух координат

$$\dot{I}_d = \dot{I}_{d_1} + \dot{I}_{d_2},\ \dot{I}_q = \dot{I}_{q_1} + \dot{I}_{q_2} = 0$$

Из условия образования круговых полей первой гармоники

$$\dot{I}_{q_1} = -j\dot{I}_{d_1} \frac{w_d k_{d_1}}{w_q k_{q_1}},\quad \dot{I}_{q_2} = j\dot{I}_{d_2} \frac{w_d k_{d_1}}{w_q k_{q_1}},\quad \dot{I}_{d_1} = \dot{I}_{d_2} = \frac{1}{2} \dot{I}_d,$$

$$\dot{U}_d = \dot{U} = \dot{I}_d \frac{Z_{d_1} + Z_{d_2}}{2},\quad \dot{I}_d = \frac{2\dot{U}}{Z_{d_1} + Z_{d_2}}.$$

Момент двигателя, развиваемый полем первой гармоники,

$$M'' = \frac{2p}{2\pi f}\cdot\frac{I_d^2}{4}R^{m=2}_{э\lambda=\frac{2}{3}}.$$

Рассматривая двигатель как однофазный, получаем

$$I = \frac{U}{Z_{эm=1}}.$$

Момент от поля первой гармоники

$$M = \frac{p}{2\pi f}I^2 R^{m=1}_{э\lambda=\frac{2}{3}}.$$

При равных токах фаз $I_B = I_d = I$ моменты двигателя, создаваемые первой гармоникой м. д. с., определяются через разность радикалов $R^{m=1}_{э\lambda=\frac{2}{3}}$ для прямого и обратного полей.

Поскольку по табл. 7

$$R^{m=2}_{э\lambda=\frac{2}{3}} = 2R^{m=3}_{э}, \quad R^{m=1}_{э\lambda=\frac{2}{3}} = R^{m=3}_{э},$$

то предположение, что токи равны ($I_B = I_d = I$), приводит к такому соотношению параметров:

$$[Z_1 + Z_2]_{m=3} = \left[\frac{Z_{d_1} + Z_{d_2}}{2}\right]_{m=2} = Z_{эm=1},$$

Выделяя сопротивления первичной цепи и эквивалентные сопротивления вторичной и намагничивающей цепей, запишем

$$2(r_1 + jx_1) + (Z_{1э} + Z_{2э})_{m=3} = 2r_1 + jx_{1d} + \left(\frac{Z_{d1э} + Z_{d2э}}{2}\right)_{m=2} =$$

$$= 2r_1 + jx_{1m=1} + Z_{э.пр_{m=1}} + Z_{э.об_{m=1}}.$$

Эквивалентные сопротивления для трех- и однофазной обмоток, занимающих зону в 120°, равны, а сопротивления фазы d, занимающей 120°, двухфазной машины в два раза больше, чем эквивалентные сопротивления трехфазной машины (см. табл. 7). Поэтому из равенства токов следует равенство индуктивных сопротивлений рассеяния первичной цепи схем замещения

$$2x_{1_{n=3}} = x_{1d_{m=2}} = x_{1_{m=1}}. \qquad (49)$$

Такое соотношение не вызывает возражений, поскольку рассматривается случай двух последовательно соединенных обмоток трехфазного двигателя ($\lambda_d = 2/3$).

Пусть одна фаза трехфазного двигателя рабочая; две другие отключены от сети (см. рис. 7, *б*).

Если на однофазную сеть включается одна обмотка трехфазного двигателя, то для токов и моментов по методу трех координат получим

$$\dot I_A = \dot I_0 + \dot I_1 + \dot I_2,\quad \dot I_B = 0 = \dot I_0 + a^2\dot I_1 + a\dot I_2,\quad \dot I_C = 0 = \dot I_0 + a\dot I_1 + a^2\dot I_2,$$

$$\dot U_A = \dot U = \dot U_0 + \dot U_1 + \dot U_2,\quad \dot U_B = \dot U_0 + a^2\dot U_1 + a\dot U_2,\quad \dot U_C = \dot U_0 + a\dot U_1 + a^2\dot U_2.$$

Решая систему относительно токов I, находим

$$\dot I_0 = \dot I_1 = \dot I_2 = \frac{1}{3}\dot I_A,$$

$$\dot I_A = \frac{3\dot U}{Z_0 + Z_1 + Z_2}.$$

Момент двигателя от основной гармоники поля

$$M''' = \frac{3p}{2\pi f}\frac{I_A^2}{9}R_э^{m=3}.$$

На основании метода двух координат

$$\dot I_d = \frac{2\dot U}{Z_{d_1} + Z_{d_2}},$$

$$M'' = \frac{2p}{2\pi f}\frac{I_d^2}{4}R^{m=2}_{э\lambda_d=\frac{1}{3}}.$$

Рассматривая двигатель как однофазный, имеем

$$\dot I = \frac{\dot U}{Z_{э_{m=1}\lambda=\frac{1}{3}}} \quad \text{и} \quad M' = \frac{p}{2\pi f}I^2R^{m=1}_{э_{\lambda=\frac{1}{3}}}.$$

Но

$$R^{m=2}_{э\lambda_d=\frac{1}{3}} = \frac{2}{3}R_э^{m=3} \quad \text{и} \quad R^{m=1}_{э\lambda=\frac{1}{3}} = \frac{1}{3}R_э^{m=3},$$ поэтому,

при одном и том же токе в обмотке, занимающей зону, равную 60°, моменты от первой гармоники поля получаются всеми тремя методами равные, так же как и моменты любой гармоники, поскольку соотношение параметров для них остается таким же. Рассматривая третью гармонику на основании метода трех координат, мы должны определить момент от токов нулевой последовательности

$$M^{m=3}_{\nu=3} = \frac{3\cdot 3p}{2\pi f}\left(\frac{I_A}{3}\right)^2\left[\frac{\overset{2}{x}_{m_{03}}\dfrac{\overset{1}{r}_{2_3}}{s_3}}{\left(\dfrac{\overset{1}{r}_{2_3}}{s_3}\right)^2 + (\overset{1}{x}_{2_3} + x_{m_{03}})^2} - \frac{\overset{2}{x}_{m_0}\dfrac{\overset{1}{r}_{2_3}}{2 - s_3}}{\left(\dfrac{\overset{1}{r}_{2}}{2 - s_3}\right)^2 + (\overset{1}{x}_{2_3} + x_{m_{03}})^2}\right].$$

На основании метода двух координат, раскладывая токи на составляющие из условия, чтобы третья гармоника образовала вращающиеся поля, получим

$$M_{\nu=3}^{m=2}=\frac{2\cdot 3p}{2\pi f}\left(\frac{I_d}{2}\right)^2\left[\frac{x_{md_3}^2\frac{r_{2d3}^1}{s_3}}{\left(\frac{r_{2d_3}^1}{s_3}\right)^2+(x_{2d_3}^1+x_{md_3})^2}-\right.$$

$$\left.-\frac{x_{md_3}^2\frac{r_{2d_3}^1}{2-s_3}}{\left(\frac{r_{2d_3}^1}{2-s_3}\right)^2+(x_{2d_3}^1+x_{md_3})^2}\right]_{\lambda_d=\frac{1}{3},m=2}.$$

Рассматривая двигатель как однофазный, получаем такое выражение для момента от третьей гармоники поля при $\lambda=\frac{1}{3}$ и $m=1$:

$$M_{\nu=3}^{m=1}=\frac{3p}{2\pi f}I^2\left[\frac{x_{m_3}^2\frac{r_{2_2}^1}{s_3}}{\left(\frac{r_{2_3}^1}{s_3}\right)^2+(x_{2_3}^1+x_{m_3})^2}-\frac{x_{m_3}^2\frac{r_{23}^1}{2-s_3}}{\left(\frac{r_{2_3}^1}{2-s_3}\right)^2+(x_{2_3}^1+x_{m_3})^2}\right].$$

Полная идентичность выражений для момента от третьей гармоники, полученных методами двух координат и разложения поля на два пульсирующие, очевидна, поскольку параметры схемы замещения однофазного двигателя в два раза меньше аналогичных параметров двухфазного.

Значения моментов от токов нулевой составляющей совпадают, так как при этом сопротивления намагничивающего контура и вторичной цепи в три раза больше аналогичных параметров при однофазной работе и равны $^3/_2$ параметров третьей гармоники для обмотки двухфазной машины, занимающей фазную зону 60°.

Из условий равенства токов находим

$$\frac{Z_0+Z_1+Z_2}{3}=\frac{Z_{d_1}+Z_{d_2}}{2}=Z_{m=1}. \qquad (50)$$

Рассматривая первое уравнение в (50) и учитывая, что при неподвижном роторе сопротивления прямой и обратной последовательности равны, т. е.

$$Z_1=Z_2=Z_к,\ \ Z_{d1}=Z_{d2}=Z_{dк},$$

находим значение для сопротивления фазы d двухфазного двигателя при неподвижном роторе через сопротивление симметричного трехфазного двигателя при $s=1$

$$Z_{d\text{к}} = \frac{1}{3} Z_0 + \frac{2}{3} Z_\text{к}. \qquad (51)$$

Соотношение (51), как показывают данные испытаний двигателя МА 142 = 1/4, хорошо удовлетворяется. Если ток в обмотке статора $I = 14$, a, то

$$Z = r_0 + jx_0 = 1{,}57 + j3{,}1 \text{ ом},$$

$$Z_\text{к} = r_\text{к} + jx_\text{к} = 2{,}26 + j3{,}8 \text{ ом},$$

$$\frac{1}{3} Z_0 + \frac{2}{3} Z_\text{к} = \frac{1}{3}(1{,}57 + j3{,}1) + \frac{2}{3}(2{,}26 + j3{,}8) = 2{,}03 + j3{,}57 \text{ом} \qquad (52)$$

Опытные данные для фазы d двухфазного двигателя при $I = 14a$,

$$Z_{d_k} = 2{,}07 + j\,3{,}57 \text{ ом}.$$

Для фазы q при коротком замыкании

$$Z_{q_k} = 2Z_k = 4{,}52 + j7{,}6 \text{ ом}.$$

Опытом для фазы q найдено значение

$$Z_{q_k} = 4{,}3 + j7{,}8 \text{ ом}.$$

Как видим, совпадение результатов измерений удовлетворительное. Отклонения активных сопротивлений объясняются неодинаковым нагревом машины во время опытов короткого замыкания.

Выделим для каждого из сопротивлений уравнения (50) составляющие, обусловленные первичной и эквивалентной цепями. Эквивалентная цепь заменяет намагничивающую и вторичные цепи основной гармоники

$$\frac{Z_0 + Z_{1,1} + Z_{1,2} + Z_{1э} + Z_{2э}}{3} = \frac{Z_{1,1d} + Z_{1,2d} + Z_{1dэ} + Z_{2dэ}}{2} =$$

$$= Z_{1m=1} + Z_{\text{пр.э}m=1} + Z_{\text{об,э}m=1}.$$

Для вторичных и намагничивающих цепей, учитывающих только основную волну, справедливо равенство

$$\frac{Z_{1э} + Z_{2э}}{3} = \frac{Z_{1dэ} + Z_{2dэ}}{2} = Z_{\text{пр.э}m=1} + Z_{\text{об.э}m=1}.$$

Тогда для параметров первичных цепей должны выполняться равенства

$$\left(\frac{Z_0 + Z_{1,1} + Z_{1.2}}{3}\right)_{m=3} = \left(\frac{Z_{1.1d} + Z_{1.2d}}{2}\right)_{m=2} = Z_{1m=1}$$

Здесь индексом 1 обозначено сопротивление первичной цепи схемы замещения.

Рассматривая каждое из первичных сопротивлений, можем выделить составляющие, обусловленные потоками рассеяния в пазах, лобовых частях, а также сопротивления, вызванные наличием полей высших гармоник статорной обмотки, называемых дифференциальными.

Для первичных параметров трехфазной системы на основании соотношений (2), (4), (5)

$$\frac{1}{3}\left[Z_0 + Z_{1,1} + Z_{1,2}\right]_{m=3} = \frac{1}{3}\left[3r_1 + jx_{\text{л.п.0}} + 2jx_{\text{л.п.1}} + \right.$$

$$\left. + \sum_{\nu \neq 1}^{\infty}\left(Z_{\nu(s_\nu)} + Z_{\nu(2-s_\nu)}\right)\right]_{m=3}. \qquad (53)$$

Для первичных параметров включенной обмотки при двухфазной системе и $\lambda_d = \frac{1}{3}$ на основании схем замещения и табл. 5, получаем

$$\frac{1}{2}\left[Z_{1,1d} + Z_{1,2d}\right]_{m=2} = \frac{1}{2}\left[2r_1 + 2jx_{\text{л.п.1}} + \right.$$

$$\left. + \sum_{\nu \neq 1}^{\infty}\left(Z_{\nu(s_\nu)} + Z_{\nu(2-s_\nu)}\right)\right]_{m=2}. \qquad (54)$$

Сопротивление первичной цепи обмотки на основании метода двух вращающихся полей

$$Z_{1\,m=1} = \left[r_1 + jx_{\text{л.п.1}} + \sum_{\nu \neq 1}^{\infty}\left(Z_{\nu(s_\nu)} + Z_{\nu(2-s_\nu)}\right)\right]_{m=1}. \qquad (55)$$

Принимая во внимание данные табл. 6 при $\lambda = \frac{1}{3}$, находим из формул (52) — (55) соотношение для сопротивлений рассеяния в пазовых и лобовых частях

$$\left(\frac{x_{\text{л.п.0}} + 2x_{\text{л.п.1}}}{3}\right)_{m=3} = (x_{\text{л.п.1}})_{m=2} = (x_{\text{л.п.1}})_{m=1}. \qquad (56)$$

Эти уравнения показывают, что реактивное сопротивление рассеяния в пазовой и лобовой частях для токов нулевой последовательности должно быть равно сопротивлению рассеяния в этих частях для токов прямой и обратной последовательности.

Величина сопротивления рассеяния пазовых и лобовых частей фазы не зависит от того, рассматривается ли данная фаза как часть одно-, двух- или трехфазной обмоток. Последнее не всегда находит подтверждение в формулах, используемых для

расчетов рассеяния в пазовых и лобовых частях обмоток. Поскольку мы под этим сопротивлением подразумевали ту часть сопротивления, которая не зависит от взаимной индукции фаз, соотношение (56) справедливо.

Поэтому эквивалентность методов трех и двух координат и метода двух вращающихся полей сомнений не вызывает. Наличие токов и моментов нулевой последовательности — это только особая форма учета влияния третьих пространственных гармоник в трехфазных системах.

Определение параметров двухфазной машины с обмотками, сдвинутыми в пространстве на 90°, опытным путем

Определение опытным путем параметров двухфазного несимметричного двигателя весьма сложно. Число уравнений, связывающих параметры, как правило, меньше числа неизвестных величин. Для симметричных машин круговая диаграмма строится на основании суммарного реактивного сопротивления короткого замыкания, разделение реактивных сопротивлений требуется не всегда. Для несимметричных машин разделение реактивных параметров позволило бы более точно рассчитать величину емкости и характеристику конденсаторного двигателя.

Значительные трудности возникают при опытах холостого хода, так как здесь необходимо круговое прямо вращающееся поле. При эллиптическом вращающемся поле обратно вращающаяся составляющая значительно искажает результаты.

Для определения параметров несимметричной машины необходимо знать размещение осей обмоток в пространстве и эффективные числа витков обмоток для основной гармоники. Наряду с обычными приборами требуется векторомерное устройство для измерения сдвига фаз между токами.

Обмотки двигателя, сдвинутые в пространстве на 90°, при неподвижном роторе не влияют одна на другую. Опыт короткого замыкания может быть проведен при включении только одной обмотки.

В работах Ю. С. Чечета [44, 48] режим однофазного включения использован для определения параметров как короткого замыкания, так и холостого хода.

При этом все же необходимо было принять допущения, что

$$x_{1q} = x'_{2q}, \quad x_{1d} = x'_{2d},$$

где индексы 1 и 2 соответствуют статору и ротору. Изменением параметров вследствие вытеснения тока пренебрегаем. При включении одной обмотки проводится два опыта этим методом, записываются ток, напряжение и мощность.

При включении фазы d

$$\dot{I}_d = \frac{2\dot{U}_d}{Z_{d_1} + Z_{d_2}}. \tag{57}$$

Если же включена только фаза q, то

$$\dot{I}_q = \frac{2\dot{U}_q}{Z_{q1} + Z_{q2}}. \qquad (58)$$

При неподвижном роторе $Z_{d1} = Z_{d2}$, $Z_{q1} = Z_{q2}$,

$$\dot{I}_{dk} = \frac{\dot{U}_d}{Z_{dk}}, \qquad (59)$$

$$\dot{I}_{qk} = \frac{\dot{U}_q}{Z_{qk}}. \qquad (60)$$

Следовательно, зная мощности, напряжения и токи фаз, можно определить параметры

$$Z_{dk} = r_{dk} + jx_{dk}, \quad Z_{qk} = r_{qk} + jx_{qk}.$$

Из схем замещения (см. рис. 5 и 6) при $s = 1$ найдем

$$r_{qk} = r_{1q} + \frac{x_{mq}^2 r'_{2q}}{r'^2_{2q} + (x_{mq} + x'_{2q})^2}, \qquad (61)$$

$$x_{qk} = x_{1q} + \frac{x_{mq}(r'^2_{2q} + x'^2_{2q}) + x_{mq}^2 x'_{2q}}{r'^2_{2q} + (x_{mq} + x'_{2q})^2}. \qquad (62)$$

При $s = 0$ и однофазном включении

$$\dot{I}_{qs=0} = \frac{\dot{U}_q}{\frac{1}{2}(Z_{q1} + Z_{q2})_{s=0}}. \qquad (63)$$

По показаниям приборов найдем результирующие активные и реактивные сопротивления

$$r_{qxx} = \frac{P_{qxx}}{I^2_{qs=0}}, \qquad (64)$$

$$x_{qxx} = \sqrt{\left(\frac{U_q}{I_{qs=0}}\right)^2 - r^2_{xx}}. \qquad (65)$$

В соответствии со схемами замещения и принятыми допущениями о постоянстве параметров найдем

$$r_{qxx} = r_{1q} + \frac{1}{2}\,\frac{x_{mq}^2 \frac{r'_{2q}}{2}}{\left(\frac{r'_{2q}}{2}\right)^2 + (x_{mq} + x_{2q})^2}, \qquad (66)$$

$$x_{qxx} = x_{1q} + \frac{1}{2} x_{mq} + \frac{1}{2} \cdot \frac{x_{mq}\left(\frac{r'_{2q}}{2}\right)^2 + x_{mq}x'_{2q}(x_{mq} + x'_{2q})}{\left(\frac{r'_{2q}}{2}\right)^2 + (x_{mq} + x'_{2q})^2}. \quad (67)$$

Таким образом имеем четыре уравнения. Число неизвестных (x_{1q}, r'_{2q}, x'_{2q}, x_{mq}) также равно четырем. Поэтому задача об однозначном определении параметров при принятых допущениях разрешима Однако эти уравнения обычно не решаются Принимают, что $r_{q\text{х.х}} = 0$, влиянием активных сопротивлений в уравнении (67) пренебрегают.

Основные соотношения для определения параметров приводятся к такому простому виду:

$$x_{1q} = x'_{2q} = x_{0q} - x_{mq}, \quad (68)$$

$$x_{mq} = \sqrt{x_{0q}(x_{0q} - x_{iq})}, \quad (69)$$

$$r'_{2q} = \frac{x_{0q}(r_{qk} - r_{1q})}{x_{0q} - x_{iq}}, \quad (70)$$

где

$$x_{iq} = \frac{U_q}{I_{qs=0}} - \sqrt{\left(\frac{U_q}{I_{qs=0}} - x_{qk}\right)^2 + (r_{qk} - r_{1q})^2}, \quad (71)$$

$$x_{0q} = \frac{2U_q}{I_{qs=0}} - x_{iq}. \quad (72)$$

Заменив индекс q на d, можно определить параметры фазы d. Преимущество этого метода — простота, недостаток — невозможность применить его для двигателей с вытеснением тока в роторе, а также неточное определение параметров в роторной цепи.

Пример. Для трехфазного асинхронного двигателя типа АК 60-4 с фазным ротором методом Ю. С. Чечета получаем при $\lambda_d = 1/3$ и $\lambda_q = 2/3$:

$$r'_{2q} = 2{,}47\ ом,\ x_{mq} = 89{,}5\ ом,\ x_{1q} = x'_{2q} = 3{,}5\ ом,\ r'_{2d} = 0{,}877\ ом,$$

$$x_{md} = 29{,}3\ ом,\ x_{1d} = x'_{2d} = 2{,}05\ ом.$$

При симметричном трехфазном включении $r'_2 = 0{,}171 \cdot 2{,}64^2 = 1{,}19$ *ом* (замерено в роторе);

$$x_1 = x'_2 = 1{,}83\ ом,\ x_m = 37{,}9 - 1{,}83 = 36{,}07\ ом,\ r_m = 2{,}41\ ом,$$

$$Z_0 = r_0 + jx_0 = 1{,}03 + j4{,}34\ ом.$$

По соотношениям табл. 7 найдем

$$r'_{2q} = 2r'_2 = 2{,}38\ ом,\ x_{mq} = 72\ ом,\ x_{1q} = x'_{2q} = 2x_1 = 3{,}66\ ом,$$

$$r'_{2d} = \frac{2}{3} r'_2 = 0{,}794\ ом, \quad x_{md} = \frac{2}{3} x_m = 24\ ом,$$

$$x_{dк} = \frac{1}{3} x_0 + \frac{2}{3} x_{1к} = \frac{1}{3} 4{,}34 + \frac{2}{3} 3{,}66 = 3{,}88\ ом,$$

$$x'_{2d} = \frac{2}{3} x'_2 = \frac{2}{3} 1{,}83 = 1{,}22\ ом, \quad x_{1d} = 3{,}88 - 1{,}22 = 2{,}66\ ом.$$

Определение параметров по данным каталога трехфазных двигателей

Оригинальный метод определения сопротивлений нулевой, прямой и обратной составляющих сил симметричных трехфазных двигателей по данным каталога предложил М. Д. Каминский [84].

Сопротивление прямой последовательности определяется по напряжению, току и коэффициенту мощности двигателя

$$Z_{1н} = \frac{U_н}{I_н} (\cos \varphi_н + j \sin \varphi_н). \qquad (73)$$

Сопротивление обратной последовательности принимается равным сопротивлению короткого замыкания

$$Z_2 \approx Z_к = \frac{U_н}{k_i I_н} (\cos \varphi_к + j \sin \varphi_к), \qquad (74)$$

где $k_i = \frac{I_п}{I_н}$ — кратность пускового тока.

Коэффициент мощности при пуске двигателя определен на основании допущения, что приведенные сопротивления роторной цепи равны сопротивлениям первичной цепи

$$x'_2 = x_1, \quad r'_2 = r_1, \quad r_к = r_1 + r'_2, \quad x_к = x_1 + x'_2.$$

При этом электромагнитная мощность, определяющая пусковой момент, равна половине мощности короткого замыкания и может быть выражена через номинальную мощность двигателя и кратность пускового момента

$$k_м = \frac{M_п}{M_н},$$

$$\frac{P_к}{2} = k_м \frac{P_н}{1 - s_н}.$$

Тип двигателя	$P_н$, *квт*	$\cos\varphi_н$	$S_н$, %	Опыт	
				Z_k, *ом*	$\cos\varphi_к$
А 42-4	2,8	0,84	5,33	8,03	0,54
А 41-4	1,7	0,83	5,33	13,9	0,532
А 41-6	1,0	0,72	7	23,4	0,537
АК 60-4	7,0	0,84	6,67	4,0	0,44
АОС 51-4	4,5	0,86	11	6,42	0,647
МА 142-1/4	5,5	0,84	3,66	4,41	0,497
МА 142-1/8	2,7	0,7	4,3	7,7	0,48
МА 142-1/6	3,8	0,77	4,0	7,14	0,39

Подставляя значения $P_н = 3U_н I_н \cos\varphi_н \eta_н$ и $P_к = 3U_н k_i I_н \cos\varphi_к$, находим

$$\cos\varphi_к = \frac{2k_м}{k_i}\cdot\frac{\eta_н}{1 - s_н}\cos\varphi_н. \qquad (75)$$

Для сопротивления нулевой последовательности М. Д. Каминский принимает соотношение

$$Z_0 \approx \frac{Z_к}{2} = \frac{Z_{1н}}{2k_i}(\cos\varphi_к + j\sin\varphi_к). \qquad (76)$$

Формулы (74) и (75) для большинства асинхронных двигателей дают близкие к действительным результаты. Соотношение (76) не может быть признано правильным. Как было показано выше, сопротивление нулевой последовательности состоит из активного сопротивления первичной обмотки, сопротивления рассеяния в пазовых и лобовых частях и сопротивлений, обусловленных наличием пульсирующих полей третьей гармоники. Сопротивление нулевой последовательности (в двигателях с короткозамкнутым ротором) в действительности значительно больше, чем по формуле (76).

В табл. 8 приведены опытные данные асинхронных двигателей с диаметральной обмоткой статора. Эти данные получены при пониженных напряжениях. Условия отдельных экспериментов несколько отличаются между собой.

Для сопротивления нулевой последовательности приводятся значения при неподвижном роторе. Однако опыты показывают, что для асинхронных двигателей с диаметральной обмоткой статора и короткозамкнутым ротором небольшой мощности сопротивление нулевой последовательности может быть определено соотношением

$$Z_0 \approx Z_к = \frac{Z_{1н}}{k_i}(\cos\varphi_к + j\sin\varphi_к) \qquad (77)$$

ные данные

Z_2, *ом*	$\cos\varphi_2$	Z_0, *ом*	$\cos\varphi_0$	$Z_{d\text{к}}$, *ом*	$\cos\varphi_{d\text{к}}$	Z_{qk}, *ом*	$\cos\varphi_{q\text{к}}$
7,35	0,44	7,9	0,5	7,8	0,486	15,95	0,483
13,5	0,47	—	—	14,4	0,53	27,8	0,533
21,8	0,5	17,5	0,565	22,1	0,52	46,6	0,52
—	—	4,44	0,23	4,26	0,364	8,17	0,47
5,9	0,54	6,13	0,479	—	—	—	—
4,33	0,483	4,06	0,34	4,1	0,47	9,14	0,48
7,44	0,467	6,48	0,41	7,2	0,48	15,6	0,48
6.56	0,421	6.62	0247	7,0	0,386	15,2	0,39

В двигателе АК 60-4 ротор трехфазный. Третья пространственная гармоника не взаимодействует с ним. Поэтому $\cos\varphi_0$ для двигателя с фазным ротором значительно меньше, чем при коротком замыкании. Из опытных данных также следует, что при включении трехфазного двигателя с короткозамкнутым ротором в качестве однофазного параметры фаз могут быть определены при неподвижном роторе из соотношений

$$Z_{d\text{к}} = \frac{1}{3} Z_0 + \frac{2}{3} Z_\text{к},$$

$$Z_{q\text{к}} = 2Z_\text{к}, \tag{78}$$

$$\cos\varphi_\text{к} = \cos\varphi_{d\text{к}} = \cos\varphi_{q\text{к}}$$

$\left(\text{фазные зоны } \lambda_d = \frac{1}{3} \text{ и } \lambda_q = \frac{2}{3}\right)$.

При номинальной скорости на параметры фаз главным образом влияет первая (основная) гармоника поля. Поэтому они могут определяться по табл. 7, из которой следует соотношение

$$\frac{Z_d}{Z_q} = \left(\frac{w_d k_{d1}}{w_q k_{q1}}\right)^2 = k^2. \tag{79}$$

Относительные значения симметричных составляющих напряжений. Расчеты механических характеристик

Уравнения разложения напряжений и токов (1) и (12) на основании методов двух и трех координат наиболее часто применяются к фазным величинам. Решая совместно системы уравнений включения двигателя и уравнений разложения, находят симметричные составляющие напряжений, токов, а затем напряжения, токи фаз и другие величины.

Моменты от прямо и обратно вращающихся полей рассчитываются на основе схем замещения и модулей токов нулевой, прямой и обратной последовательностей. При расчетах и испытаниях симметричных двух- и трехфазных двигателей обычно определяются механические характеристики двигателей при постоянном напряжении. Наиболее целесообразно рассчитывать моменты однофазных двигателей также через составляющие напряжений нулевой, прямой и обратной последовательностей.

Для некоторых схем однофазных двигателей можно указать номинальное фазное напряжение обмоток статора $U_{н.ф}$. В этом случае для расчетов удобно использовать комплексы относительных значений напряжений нулевой, прямой и обратной последовательностей, определяемых соотношениями [72]

$$\bar{U}_0 = \frac{\dot{U}_0}{U_{н.ф}},\ \bar{U}_1 = \frac{\dot{U}_1}{U_{н.ф}},\ \bar{U}_2 = \frac{\dot{U}_2}{U_{н.ф}}. \tag{80}$$

Напряжения фаз могут быть записаны через относительные значения

$$\bar{U}_A = \frac{\dot{U}_A}{U_{н.ф}} = \bar{U}_0 + \bar{U}_1 + \bar{U}_2,$$
$$\bar{U}_B = \frac{\dot{U}_B}{U_{н.ф}} = \bar{U}_0 + a^2\bar{U}_1 + a\bar{U}_2, \tag{81}$$
$$\bar{U}_C = \frac{\dot{U}_C}{U_{н.ф}} = \bar{U}_0 + a\bar{U}_1 + a^2\bar{U}_2.$$

При расчетах токов фаз можно воспользоваться значениями токов нулевой, прямой и обратной последовательностей в обмотках статора при напряжениях нулевой, прямой и обратной последовательностей, равных номинальному фазному напряжению

$$\dot{I}_{0н} = U_{н.ф}y_0 = \frac{U_{н.ф}}{Z_0},$$
$$\dot{I}_{1н} = U_{н.ф}y_1 = \frac{U_{н.ф}}{Z_1}, \tag{82}$$
$$\dot{I}_{2н} = U_{н.ф}y_2 = \frac{U_{н.ф}}{Z_2}.$$

При учете (82) составляющие токов фаз можно определить такими соотношениями

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_{0н}\bar{U}_0;\ \dot{I}_1 = \dot{I}_{1н}\bar{U}_1;\ \dot{I}_2 = \dot{I}_{2н}\bar{U}_2. \tag{83}$$

Токи фаз записываются в таком виде:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{0н}\bar{U}_0 + \dot{I}_{1н}\bar{U}_1 + \dot{I}_{2н}\bar{U}_2;$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{0н}\overline{U}_0 + a^2\dot{I}_{1н}\overline{U}_1 + a\,\dot{I}_{2н}\overline{U}_2, \qquad (84)$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{0н}\overline{U}_0 + a\dot{I}_{1н}\overline{U}_1 + a^2\dot{I}_{2н}\overline{U}_2.$$

Соотношения (82) и (83) позволяют выразить моменты от токов нулевой, прямой и обратной последовательности через моменты, которые развивает двигатель при постоянных напряжениях,

$$M_0 = M_{0н}\,|\overline{U}_0|^2,$$

$$M_1 = M_{1н}\,|\overline{U}_1|^2, \qquad (85)$$

$$M_2 = M_{1н}\,|\overline{U}_2|^2.$$

Здесь $M_{0н}$, $M_{1н}$, $M_{2н}$ — моменты от токов нулевой, прямой и обратной последовательности при неизменных напряжениях нулевой, прямой и обратной последовательностей, равных номинальному фазному напряжению.

Значения $M_{1н}$ и $M_{2н}$ соответствуют моментам в режиме двигателя и противовключения при номинальном напряжении в кру-

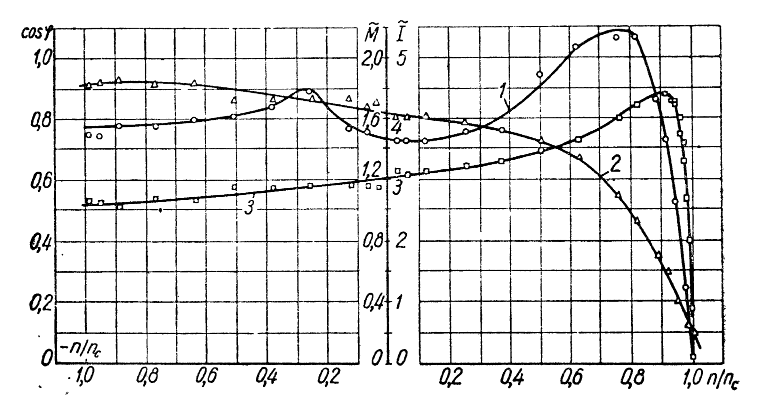


Рис. 8. Характеристика двигателя А 41-4 в симметричном трехфазном режиме:

$U_{н.ф}=220в$; $I_{н.ф}=3,9а$; $P_н=1,7квт$; $M_н=1,17кгм$; 1—$\widetilde{M}$; 2—$\widetilde{I}$; 3—cos φ.

товом поле; $M_{1н}$ и $M_{2н}$ могут быть определены опытным путем (рис. 8).

Момент от токов нулевой последовательности также может быть определен экспериментально. Для этого необходимо соединить обмотки последовательно и включить на напряжение, равное трем номинальным фазным напряжениям.

Если опыт проводится при других напряжениях, необходимо пересчитать моменты пропорционально квадрату напряжений. На рис. 9 приводятся значения $M_{0н}$ в функции скорости для двигателя А 41-4. Значения моментов на рис. 8 и 9 отнесены к

номинальному для двигателя в симметричном трехфазном режиме при номинальной скорости.

Результирующий момент на валу двигателя при вращении ротора в сторону поля прямой последовательности определяется соотношением

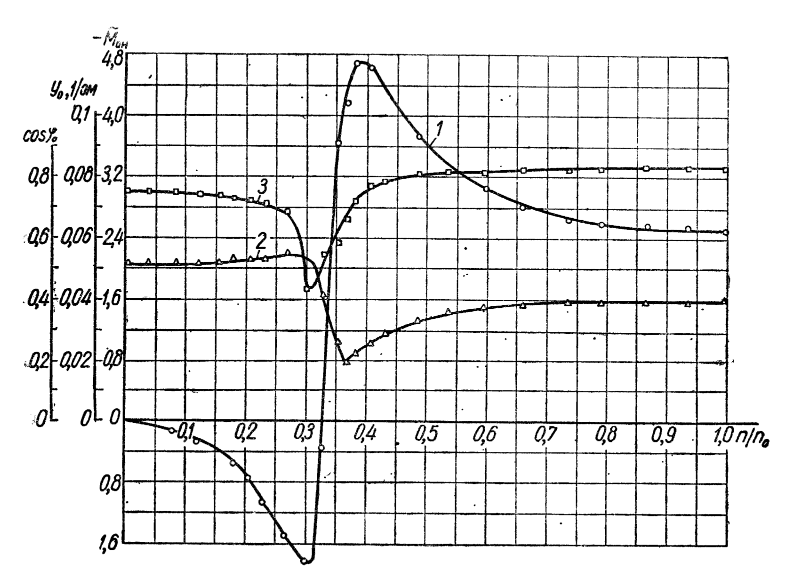


Рис. 9. Зависимость параметров нулевой последовательности от скорости вращения ротора для двигателя А 41-4.

($P_н$=1,7 *квт*; $M_н$=1,17*кгм*; $I_н$=3,9 *а*; $\ddot{U}_{0н}$=220*в*) 1=М; 2—cosφ; 3—y_0.

$$M = M_{1н}\,|\bar{U}_1|^2 - M_{2н}\,|\bar{U}_2|^2 + M_{0н}\,|\bar{U}_0|^2. \qquad (86)$$

Момент от токов нулевой последовательности для двигателей без вытеснения тока в роторе при скоростях $\frac{n}{n_c} < \frac{1}{3}$ — движущий, а при скоростях $\frac{n}{n_c} > \frac{1}{3}$ — тормозной; это обстоятельство необходимо учитывать в соотношении (86). При

$$n = 0,\ M_{0н} = 0,\quad M_{1н} = M_{2н} = M_{пн}.$$

Пусковой момент двигателя в несимметричном режиме определяется разностью квадратов модулей относительных значений напряжений прямой и обратной последовательностей

$$\mu_п = \frac{M_п}{M_{п.н}} = |\bar{U}_1|^2 - |\bar{U}_2|^2. \qquad (87)$$

Относительными значениями напряжений можно воспользо-

ваться также в схемах включения двигателей с двухфазными обмотками статора. Метод симметричных составляющих, позволяющий определить моменты через параметры одной фазы, весьма удобен и в этом случае.

Определение направления вращения ротора и схем замещения для симметричных составляющих

До сих пор не существует единого мнения о том, какая последовательность должна быть названа прямой. Р. Рихтер [61] считает прямой ту последовательность, в направлении поля которой вращается ротор. М. П. Костенко [58], рассматривая ОКД, установил, что для токов прямой последовательности должна быть принята схема замещения со скольжением $2-s$, т. е. поле прямой последовательности вращается противоположно вращению ротора.

Исследование полей, вызванных токами прямой и обратной последовательностей, показывает, что название прямой и обратной последовательностей связано только с направлением вращения поля относительно системы координат, неподвижной относительно статора [70].

В уравнениях (1) метода симметричных составляющих эти пространственные соотношения заменяются чередованием векторов напряжений и токов фаз на векторной диаграмме.

Направление вращения ротора определяется схемой включения обмоток и соотношением параметров; оно не зависит от выбора направления отсчета углов.

Направление вращения ротора может определяться внешними силами. Например, асинхронный двигатель с одной обмоткой на статоре при неподвижном роторе имеет момент, равный нулю. Направление вращения ротора зависит от внешних сил (синхронные моменты от высших гармоник мы здесь не рассматриваем).

При любых системах симметричных составляющих характеристики двигателя можно правильно рассчитать, если известны значения сопротивлений Z_0, Z_1, и Z_2. Сопротивление нулевой последовательности не зависит от направления вращения ротора; Z_1 и Z_2 определяются направлением вращения ротора. Если двигатель вращается в направлении поля прямой последовательности со скольжением s, то параметры вторичной цепи схемы замещения Z_1 определяются через скольжение s. Сопротивление Z_2 определяется через скольжение $2-s$. Если ротор вращается в направлении поля обратной последовательности, то сопротивление Z_1 должно определяться скольжением $2-s$, а сопротивление Z_2 скольжением s.

В зависимости от конкретных условий включения двигателя схема замещения для симметричных составляющих фазных напряжений и токов должна выбираться с учетом направления

вращения ротора. Последнее определяется величиной и направлением движущего момента на валу двигателя. Принимая положительными угловую скорость и моменты поля прямой последовательности, запишем уравнения движения ротора так:

$$I\frac{d\omega}{dt} = M_1 - M_2 + M_0 - M_c = M_{дв}, \qquad (88)$$

где I — момент инерции ротора двигателя; M_c — момент сопротивления на валу двигателя.

Движущий момент $M_{дв}$ может быть положительным; при этом ротор вращается в направлении поля прямой последовательности. При отрицательном же движущем моменте ротор вращается в направлении поля обратной последовательности.

Если машина работает в режиме двигателя, а момент сопротивления реактивный, для определения направления вращения достаточно по (87) определить знак пускового момента. При $\mu_п > 0$ ротор двигателя вращается в направлении поля прямой последовательности. Таким образом, для определения сопротивлений Z_1 и Z_2 нужно найти напряжения U_1 и U_2, которые сами зависят от Z_1 и Z_2. Выход может быть найден благодаря тому, что систему уравнений двигателя можно решить формально, не определяя сопротивлений Z_1 и Z_2. Воспользовавшись тем, что $Z_1 = Z_2$ при $s = 1$, можно определить направление вращения ротора, выбрать для Z_1 и Z_2 схемы замещения и вычислить их значения и для других скольжений.

Как показано в [67], в зависимости от соотношений параметров схемы ОКД необходимо выбирать схему замещения для сопротивления Z_1 со скольжением s или $2-s$.

Рассматривая схемы замещения для токов и напряжений фаз, мы предполагали, что ротор двигателя вращается в направлении поля прямой последовательности.

При анализе схем однофазных двигателей в случае необходимости направление вращения ротора устанавливается по знаку пускового момента в уравнении (87).

Глава III

ОКД С ДВУХФАЗНЫМИ ПАРАЛЛЕЛЬНО СОЕДИНЕННЫМИ ОБМОТКАМИ, СДВИНУТЫМИ В ПРОСТРАНСТВЕ НА 90°

ОКД с двухфазными параллельно соединенными и сдвинутыми в пространстве на 90° обмотками объединяют большую группу схем включения однофазных двигателей (см. табл. 2, *4*, *11*). Основное отличие двигателей, включенных по рассматриваемой схеме, состоит в том, что обмотка статора обтекается двумя отличающимися по фазе токами, хотя обмотка статора может быть выполнена трехфазной. При использовании трехфазного двигателя в качестве однофазного и параллельном включении обмоток фаза *d* может занимать $^1/_3$ обмоточного пространства, а фаза q — $^2/_3$ и наоборот. Эти случаи можно объединить, если принять, что отношение эффективных чисел витков обмоток

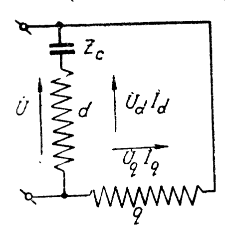


Рис. 10. Схема включения ОКД с параллельно соединенными обмотками статора.

$$k = \frac{w_d k_{d1}}{w_q k_{q1}}$$

и фазные зоны обмоток λ_d и λ_q переменные.

При этом мы будем рассматривать наиболее распространенные и простые двигатели с полностью обмотанным статором

$$\lambda_d + \lambda_q = 1 \tag{89}$$

при использовании одного фазосдвигающего сопротивления Z_c в фазе d (рис. 10)

Основные уравнения

Рассмотрим основные соотношения для ОКД при включении и обозначениях, принятых на рис. 10. На основе законов Кирхгофа имеем такие уравнения включения:

$$\dot{U} = \dot{U}_q,$$

$$\dot{U} = \dot{U}_d + \dot{I}_d Z_c = \dot{U}_d + \frac{\dot{I}_d}{y_c}, \tag{90}$$

$$I_{\text{сети}} = \dot{I}_d + I_q.$$

Раскладывая напряжения и токи фаз на составляющие по уравнениям (12), находим

$$\dot{U} = \dot{I}_{d1}(Z_{d1} + Z_c) + \dot{I}_{d2}(Z_{d2} + Z_c),$$

$$\dot{U} = \dot{I}_{q1} Z_{q1} + \dot{I}_{q2} Z_{q2}. \tag{91}$$

При учете соотношений между симметричными составляющими токов

$$\dot{I}_{q1} = -jk\dot{I}_{d1};\ \dot{I}_{q2} = jk\dot{I}_{d2} \tag{92}$$

уравнения однофазного двигателя записываются в виде

$$\dot{U} = \dot{I}_{d1}(Z_{d1} + Z_c) + \dot{I}_{d2}(Z_{d2} + Z_c),$$

$$\dot{U} = -j\dot{I}_{d1} k Z_{q1} + j\dot{I}_{d2} k Z_{q2}. \tag{93}$$

Из этих уравнений находим токи фазы d

$$\dot{I}_{d1} = \frac{\dot{U}}{k} \frac{jkZ_{q2} - Z_{d2} - Z_c}{jZ_{q2}(Z_{d1} + Z_c) + jZ_{q1}(Z_{d2} + Z_c)}, \tag{94}$$

$$\dot{I}_{d2} = \frac{\dot{U}}{k} \frac{jkZ_{q1} + Z_{d1} + Z_c}{jZ_{q2}(Z_{d1} + Z_c) + jZ_{q1}(Z_{d2} + Z_c)}, \tag{95}$$

$$\dot{I}_d = \frac{\dot{U}}{k} \frac{jkZ_{q1} + jkZ_{q2} + Z_{d1} - Z_{d2}}{jZ_{q2}(Z_{d1} + Z_c) + jZ_{q1}(Z_{d2} + Z_c)}. \tag{96}$$

Токи фазы q

$$\dot{I}_{q1} = \dot{U} \frac{kZ_{q2} + j(Z_{d2} + Z_c)}{jZ_{q2}(Z_{d1} + Z_c) + jZ_{q1}(Z_{d2} + Z_c)}, \tag{97}$$

$$\dot{I}_{q2} = \dot{U} \frac{j(Z_{d1} + Z_c) - kZ_{q1}}{jZ_{q2}(Z_{d1} + Z_c) + jZ_{q1}(Z_{d2} + Z_c)}, \tag{98}$$

$$\dot{I}_q = \dot{U} \frac{kZ_{q2} + j(Z_{d2} + Z_c) + j(Z_{d1} + Z_c) - kZ_{q1}}{jZ_{q2}(Z_{d1} + Z_c) + jZ_{q1}(Z_{d2} + Z_c)}. \tag{99}$$

Ток сети

$$I_{\text{сети}} = \dot{U} \frac{jZ_{q2} - \frac{Z_{d2}}{k} + \frac{Z_{d1}}{k} + jZ_{q1} + kZ_{q2} + jZ_{d2} + jZ_{d1} + j2Z_c - kZ_{q1}}{jZ_{q2}(Z_{d1} + Z_c) + jZ_{q1}(Z_{d2} + Z_c)}. \tag{100}$$

Составляющие напряжений фаз d и q

$$\dot{U}_{d1} = \dot{U} \frac{jZ_{d1}Z_{q2} - \frac{1}{k} Z_{d1}(Z_{d2} + Z_c)}{jZ_{q2}(Z_{d1} + Z_c) + jZ_{q1}(Z_{d2} + Z_c)}, \qquad (101)$$

$$\dot{U}_{d2} = \dot{U} \frac{\frac{1}{k} Z_{d2}(Z_{d1} + Z_c) + jZ_{d2}Z_{q1}}{jZ_{q2}(Z_{d1} + Z_c) + jZ_{q1}(Z_{d2} + Z_c)}, \qquad (102)$$

$$\dot{U}_{q1} = \dot{U} \frac{kZ_{q1}Z_{q2} + jZ_{q1}(Z_{d2} + Z_c)}{jZ_{q2}(Z_{d1} + Z_c) + jZ_{q1}(Z_{d2} + Z_c)}, \qquad (103)$$

$$\dot{U}_{q2} = \dot{U} \frac{jZ_{q2}(Z_{d1} + Z_c) - kZ_{q2}Z_{q1}}{jZ_{q2}(Z_{d1} + Z_c) + jZ_{q1}(Z_{d2} + Z_c)}. \qquad (104)$$

Напряжение фазы d

$$\dot{U}_d = \dot{U} \frac{jZ_{d1}Z_{q2} + jZ_{d2}Z_{q1} - \frac{Z_{d1}}{k}(Z_{d2} + Z_c) - \frac{Z_{d2}}{k}(Z_{d1} + Z_c)}{jZ_{q2}(Z_{d1} + Z_c) + jZ_{q1}(Z_{d2} + Z_c)}. \qquad (105)$$

Напряжение фазы q равно напряжению сети.

Уравновешенный режим

Уравновешенным называется режим работы ОКД с круговым вращающимся полем в воздушном зазоре. Можно показать, что при активном и емкостном сопротивлениях в фазе d ротор двигателя вращается в сторону поля прямой последовательности.

Поэтому условия получения уравновешенного режима будем искать из уравнений

$$\dot{U}_{d2} = \dot{U}_{q2} = \dot{I}_{d2} = \dot{I}_{q2} = 0. \qquad (106)$$

По уравнениям (102), (104) находим соотношения параметров фаз для получения уравновешенного режима

$$Z_{d1} + Z_c + jkZ_{q1} = 0. \qquad (107)$$

При

$$Z_{d1} = r_{d1} + jx_{d1}, \quad Z_c = r_c - jx_c, \quad Z_{q1} = r_{q1} + jx_{q1}$$

получаем такие значения активного и реактивного сопротивлений:

$$r_c = kx_{q1} - r_{d1}, \qquad (108)$$

$$x_c = x_{d1} + kr_{q1}, \qquad (109)$$

при включении этих сопротивлений в цепь фазы d получаем уравновешенный режим двигателя.

Если активное сопротивление конденсаторной батареи равно нулю ($r_c = 0$), то отношение эффективных чисел витков фаз и емкостное сопротивление должны удовлетворять соотношениям

$$k = \frac{r_{d1}}{x_{q1}}, \tag{110}$$

$$x_c = x_{d1} + \frac{r_{d1}}{x_{q1}} r_{q1} = |Z_{d1}| \frac{\cos(\varphi_{d1} - \varphi_{q1})}{\sin \varphi_{q1}}, \tag{111}$$

где $|Z_{d1}|$ — модуль сопротивления прямой последовательности фазы d; φ_{d1} и φ_{q1} — фазовые углы.

В некоторых случаях можно принять, что отношения полных (активных и индуктивных) эквивалентных сопротивлений фаз пропорциональны квадрату чисел витков

$$\left| \frac{Z_{d1}}{Z_{q1}} \right| = \frac{r_{d1}}{r_{q1}} = \frac{x_{d1}}{x_{q1}} = k^2, \tag{112}$$

а фазовые углы равны: $\varphi_{d1} = \varphi_{q1}$. При этих условиях получаем известные соотношения для k и x_c

$$k = \operatorname{tg} \varphi_{q1}, \tag{113}$$

$$x_c = \frac{|Z_{d1}|}{\sin \varphi_{q1}} = |Z_{q1}| \frac{\sin \varphi_{q1}}{\cos^2 \varphi_{q1}}. \tag{114}$$

Для обмоток статора из проводов одинакового сечения при равном заполнении паза отношение эффективных чисел витков

$$k = \frac{w_d k_{d1}}{w_q k_{q1}} = \operatorname{tg} \lambda_d \frac{\pi}{2}, \tag{115}$$

где λ_d — ширина фазной зоны обмотки d.

При переменных фазных зонах обмоток d и q соотношения (112) в точности не удовлетворяются, так как активные сопротивления обмоток пропорциональны первой степени чисел витков, а в дифференциальные сопротивления обмоток входят составляющие различных гармоник. Для составляющих сопротивлений, обусловленных вторичными и намагничивающими контурами в схемах замещения, пропорциональность сопротивлений квадрату чисел витков сохраняется. Поэтому в рабочем режиме соотношение (112) удовлетворяется с достаточной точностью и для двигателей с неравными фазными зонами обмоток. В режиме короткого замыкания, когда влияние сопротивления первичной цепи велико, соотношение (112) дает заметные погрешности.

Учитывая (113) и (115), находим зависимость ширины фазной зоны обмотки d и величину сдвига фаз $\varphi_{q1} = \varphi_{q1}$

$$\lambda_d \frac{\pi}{2} = \varphi_{q1} = \varphi_{d1}. \tag{116}$$

Отсюда следует, что при включении трехфазного двигателя в однофазную сеть по схеме рис. 10 уравновешенный режим с помощью емкости без потерь, включенной в фазу d, может быть получен в том случае, когда ширина фазной зоны обмотки d в градусах равна углу сдвига фаз между током и напряжением той же обмотки. Величина емкости при этом определяется соотношением (114).

Из всего изложенного следует, что при высоком коэффиценте мощности двигателя емкость необходимо включать последовательно с одной фазой. При коэффициентах мощности меньше 0,7 емкость необходимо включать последовательно с двумя фазами трехфазного двигателя. Главная фаза в данном случае занимает $^1/_3$ пазов статора.

При симметричных обмотках уравновешенный режим может быть достигнут только при внутреннем коэффициенте мощности $\cos\varphi = 0{,}707$.

В уравновешенном режиме ток сети определяется соотношением

$$I_{\text{сети}} = \frac{U}{Z_{q1}}\left(1 + \frac{j}{k}\right)$$

Принимая, что $k = \operatorname{tg}\varphi_{q1}$, находим после несложных преобразований

$$\dot{I}_{\text{сети}} = \frac{\dot{U}}{|Z_{q1}|\sin\varphi_{q1}}\, e^{-j(2\varphi_{q1}-90°)}$$

Поэтому коэффициент мощности двигателя по отношению к сети определяется соотношением

$$\cos\varphi_{\text{сети}} = \cos(2\varphi_{q1} - 90°). \qquad (117)$$

В табл. 9 приведены значения соотношения эффективных чисел витков фаз и коэффициента мощности сети при уравновешенном режиме двигателя в зависимости от внутреннего коэффициента мощности двигателя.

Таблица 9

$\cos\varphi_{q_1}$	k	$\varphi_{\text{сети}}=2\varphi_{q_1}-90°$	$\cos\varphi_{\text{сети}}$	$\frac{x_c}{Z_{q_1}}$
0,5	1,73	30	0,866	3,46
0,6	1,33	16	0,96	2,22
0,7	1,01	0	1	1,44
0,8	0,75	—16	0,96	0,94
0,9	0.485	—38,2	0,79	0,54

Мощность конденсаторной батареи в уравновешенном режиме

В уравновешенном режиме ток конденсаторной батареи равен току прямой последовательности фазы d

$$\dot{I}_d = \dot{U}\frac{\begin{vmatrix} 1; & Z_{d2} + Z_c \\ 1; & jkZ_{q2} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} Z_{d1} + Z_c; & Z_{d2} + Z_c \\ -jkZ_{q1}; & jkZ_{q2} \end{vmatrix}}. \tag{118}$$

Напряжение на конденсаторной батарее

$$\dot{U}_c = \dot{I}_d Z_c = \dot{U} Z_c \frac{\begin{vmatrix} 1; & Z_{d2} + Z_c \\ 1; & jkZ_{q2} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} Z_{d1} + Z_c; & Z_{d2} + Z_c \\ -jkZ_{q1}; & jkZ_{q2} \end{vmatrix}}. \tag{119}$$

Реактивная мощность конденсаторной батареи

$$P_{\text{кр}} = Im(\overset{*}{U}_c I_d), \tag{120}$$

где $\overset{*}{U}_c$ — сопряженный комплекс напряжения на конденсаторной батарее Соотношение (120) может быть записано в таком виде:

$$P_{\text{кр}} = U^2 x_c \left(\frac{\begin{vmatrix} 1; & Z_{d2} + Z_c \\ 1; & jkZ_{q2} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} Z_{d1} + Z_c; & Z_{d2} + Z_c \\ -jkZ_{q1}; & jkZ_{q2} \end{vmatrix}} \right)^2 \tag{121}$$

Согласно (107)

$$Z_c = -jkZ_{q1} - Z_{d1}, \tag{122}$$

поэтому, подставляя (122) в (121) и проводя преобразования, получаем

$$P_{\text{кр}} = \frac{U^2 x_c}{|kZ_{q1}|^2}. \tag{123}$$

Для двигателей, параметры фаз которых относятся как квадраты эффективных чисел витков и для которых справедливы уравнения (112), мощность конденсаторной батареи определяется уравнением

$$P_{\text{кр}} = \frac{U^2}{|Z_{q1}| \sin \varphi_{q1}} = \frac{U^2 |y_{q1}|}{\sin \varphi_{q1}}. \tag{124}$$

Несимметрия обмотки статора может быть вызвана неравенством фазных зон, а также чисел витков в пазах при равенстве фазных зон. Рассмотрим однофазные машины, обмотки статора которых выполнены двухфазными с равным числом пазов на фазу. Числа витков фаз могут отличаться, но вложения меди в фазы одинаковы.

Потребляемая активная мощность такого двигателя при

двухфазном питании и круговом поле может быть определена через напряжения, проводимости и коэффициенты мощности фаз

$$P_1 = 2U_d^2 |y_{d1}| \cos\varphi_{d1} = 2U_q^2 |y_{q1}| \cos\varphi_{q1}.$$

Отношение реактивной мощности конденсаторов при уравновешенном режиме к потребляемой активной мощности определяется зависимостью

$$\overline{P}_{кр} = \frac{1}{\sin 2\varphi_{q1}}. \qquad (124а)$$

В табл. 10 приводятся значения реактивной мощности конденсаторов и отношение чисел витков обмотки, при которых обеспечивается уравновешенный режим, от коэффициента мощности фазы.

Таблица 10

$\cos\varphi_{q_1}$	0,5	0,6	0,707	0,8	0,866
k	$\sqrt{3}$	1,33	1	0,75	$\frac{1}{\sqrt{3}}$
$\overline{P}_{кр}$	1,15	1,04	1	1,04	1,15

Для получения уравновешенного режима наименьшая мощность конденсаторов требуется при симметричных обмотках статора. Если обмотки двигателя несимметричны, требуемая мощность конденсаторов увеличивается. При этом конденсаторы включаются в фазу с большим числом витков, если коэффициент мощности меньше 0,707, и в фазу с меньшим числом витков, если коэффициент мощности больше 0,707.

При симметричных обмотках уравновешенный режим возможен при $\cos\varphi = \sin\varphi = 0{,}707$. При этом мощность конденсаторной батареи в вольт-амперах равна активной потребляемой мощности двигателя в ваттах

$$P_{кр} = P_1. \qquad (125)$$

Соотношение (125) удобно использовать для расчетов рабочей емкости симметричного двигателя

$$P_{кр} = P_1 = U_c^2\omega C = 2U^2\omega C. \qquad (125а)$$

Отсюда

$$C = \frac{P_1 \cdot 10^6}{2U^2\omega} [мкф]. \qquad (126)$$

Пусковой режим

В рассматриваемой схеме включения двигателя напряжение сети U, принимаемое нами за номинальное, равно напряжению фазы q. Если известна величина пускового момента $M_{п.н.}$ при круговом вращающемся поле и номинальном напряжении фазы q, то в однофазном режиме величина пускового момента может

быть определена соотношением

$$\mu_п = \frac{M_п}{M_{п.н}} = |\bar{U}_{q1}|^2 - |\bar{U}_{q2}|^2. \quad (127)$$

Относительные значения составляющих напряжений фазы q при $s = 1$ и, следовательно, при

$$Z_{d1} = Z_{d2} = Z_{dk} = \frac{1}{y_{dk}}; \quad Z_{q1} = Z_{q2} = Z_{qk} = \frac{1}{y_{qk}}$$

определяются соотношениями

$$\bar{U}_{q1} = \frac{U_{q1}}{U} = \frac{Z_{dk} + Z_c - jkZ_{qk}}{2(Z_{dk} + Z_c)} = \frac{1}{2}\,\frac{1 + \frac{y_c}{y_{dk}} - jk\frac{y_c}{y_{qk}}}{1 + \frac{y_c}{y_{dk}}}, \quad (128)$$

$$\bar{U}_{q2} = \frac{\dot{U}_{q2}}{U} = \frac{Z_{dk} + Z_c + jkZ_{qk}}{2(Z_{dk} + Z_c)} = \frac{1}{2}\,\frac{1 + \frac{y_c}{y_{dk}} + jk\frac{y_c}{y_{qk}}}{1 + \frac{y_c}{y_{dk}}}. \quad (129)$$

Принимая проводимости активно-индуктивными

$$y_{dk} = |y_{dk}|\,e^{-j\varphi_{dk}}, \quad y_{dk} = |y_{qk}|\,e^{-j\varphi_{qk}}, \quad y_c = |y_c|\,e^{-j\varphi_c},$$

находим после подстановок и преобразований такое значение пускового момента:

$$\mu_п = \frac{kZ_{dk}Z_{qk}\sin(\varphi_{qk} - \varphi_{dk}) + kZ_{qk}Z_c\sin(\varphi_{qk} - \varphi_c)}{Z_{dk}^2 + Z_c^2 + 2Z_{dk}Z_c\cos(\varphi_{dk} - \varphi_c)} =$$

$$= \frac{k\frac{y_c^2}{y_{dk}y_{qk}}\sin(\varphi_{qk} - \varphi_{dk}) + k\frac{y_c}{y_{qk}}\sin(\varphi_{qk} - \varphi_c)}{1 + 2\frac{y_c}{y_{dk}}\cos(\varphi_{dk} - \varphi_c) + \left(\frac{y_c}{y_{dk}}\right)^2}. \quad (130)$$

В этом выражении обозначения модулей опущены. Полученное соотношение позволяет определить величину пускового момента при любом типе сопротивления, включенного в фазу d, и дает возможности получить ряд частных случаев.

При

$$\varphi_{qk} = \varphi_{dk} = \varphi_k \text{ и } \frac{Z_{dk}}{Z_{qk}} = \frac{y_{qk}}{y_{dk}} = k^2$$

относительное значение пускового момента записывается в виде

$$\mu_п = \frac{1}{k} \frac{\bar{y}_c \sin(\varphi_k - \varphi_c)}{1 + 2\bar{y}_c \cos(\varphi_k - \varphi_c) + \bar{y}_c^2}, \qquad (131)$$

где $\bar{y}_c = \frac{y_c}{y_{dk}}$ — отношение включаемой в фазу d проводимости к проводимости короткого замыкания фазы d.

На рис. 11 приведены полученные расчетом при $\kappa=1$ и $\cos\varphi_\kappa=0{,}54$ относительные значения пусковых моментов однофазного конденсаторного двигателя с параллельно включенными обмотками.

Как следует из (131) и рис. 11, величина пускового момента ОКД изменяется в широких пределах. Когда $y_c=0$, пусковой

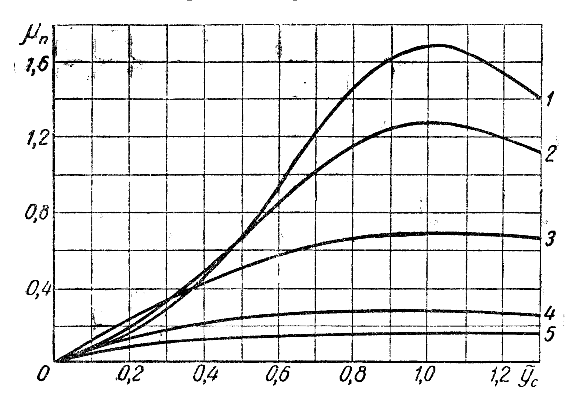


Рис. 11. Зависимость пускового момента от проводимости $\tilde{y}_c$ при параллельном включении обмоток:

1—$\varphi_c=-90°$ (емкость); 2—$\varphi_c=-80°$; 3—$\varphi_c=-50°$; 4—$\varphi_c=0$ (активное сопротивление); 5—$\varphi_c=90°$ (индуктивность);

$\kappa=\frac{w_d k_d}{w_q k_q}=1$; $\cos\varphi_\kappa=0{,}54$.

момент двигателя также равен нулю. С увеличением проводимости y_c пусковой момент растет. Последний достигает максимального значения при равенстве проводимостей фазы d и внешней y_c. Дальнейшее увеличение проводимости приводит к уменьшению пускового момента.

Как видно из рис. 11, при использовании для пуска емкости ($\varphi_c=90°$, кривая *1*) пусковой момент может быть в 1,7 раза больше пускового момента двигателя в симметричном режиме при номинальном напряжении. Это возможно вследствие резонанса напряжения и резкого увеличения его на обмотках двигателя. Повышение пускового момента ОКД можно использовать для улучшения пусковых свойств асинхронных двигателей.

Когда проводимость y_c имеет активную составляющую, максимальное значение пускового момента уменьшается. При пуске однофазного двигателя с помощью активного сопротивления (кривая *4*) величина пускового момента достигает приблизительно 30% номинального пускового момента двигателя в симметричном режиме. При использовании для пуска индуктивно-

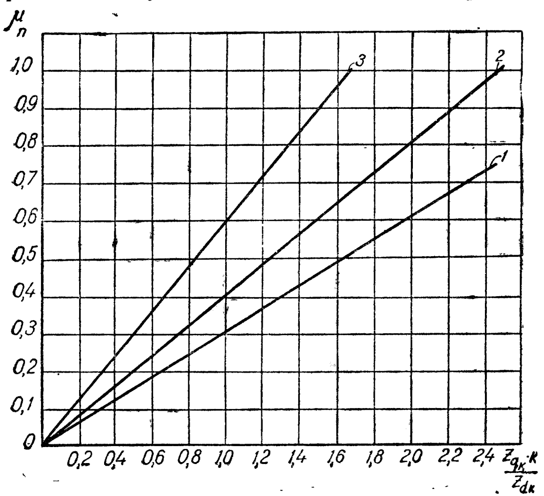


Рис. 12. Относительное значение пускового момента однофазного двигателя с повышенным сопротивлением пусковой обмотки:
1—$\sin(\varphi_{qk}-\varphi_{dk})=0,3$; 2—$\sin(\varphi_{qk}-\varphi_{dk})=0,4$;
3—$\sin(\varphi_{qk}-\varphi_{dk})=0,5$.

сти (кривая *5*) величина пускового момента достигает 15% номинального пускового момента.

В области малых проводимостей ($y_c=0$—$0,4$) пусковые моменты больше при наличии активной составляющей проводимости y_c. Поэтому для двигателей, величина пускового момента которых не должна быть больше половины пускового момента при симметричной работе для уменьшения величины требуемой пусковой емкости можно применить активное сопротивление, шунтирующее пусковую емкость [101]. Если проводимость $\bar{y}_c$ больше 0,4, кривые моментов при $\varphi_c=90°$ и при $\varphi_c=-50°$ резко расходятся. Увеличение проводимости при одновременном уменьшении фазового угла не приводит к увеличению момента.

Кривые на рис. 11, построенные на $\kappa=1$, могут быть использованы для расчетов пусковых моментов также для двигателей с несимметричными обмотками. Для этого величина момента умножается на коэффициент $\frac{1}{\kappa}$.

Если внешнее сопротивление равно нулю ($y_c=\infty$), а фаза

d выполнена с повышенным активным сопротивлением, величина пускового момента определяется соотношением

$$\mu_{п} = k \frac{Z_{qk}}{Z_{dk}} \sin(\varphi_{qk} - \varphi_{dk}) \tag{132}$$

и может быть значительной (рис. 12)

Пусковые токи определяются соотношениями

$$\dot{I}_{dk} = \dot{U} y_{dk},\ I_{qk} = \dot{U} y_{qk},\ I_{ти} = \dot{U}(y_{dk} + y_{qk}). \tag{133}$$

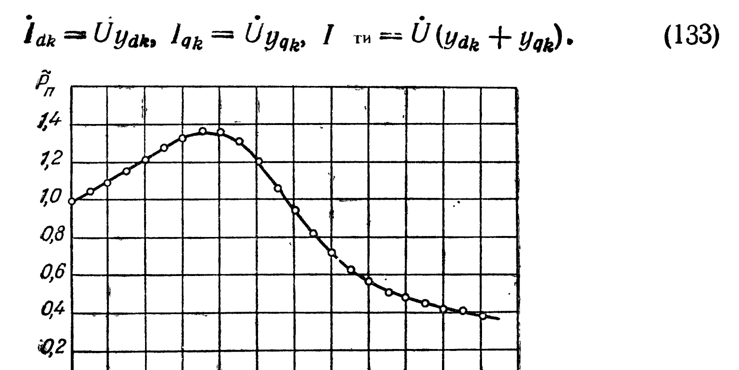


Рис. 13. Отношение пусковых мощностей ОКД с симметричными обмотками двухфазного двигателя в зависимости от величины емкостного сопротивления при $\cos\varphi_k = 0{,}5$.

Пусковые токи в двигателях такого типа в шесть — девять раз больше номинального. Относительное значение пускового момента, выраженное через токи фаз, равно

$$\mu_{п} = k \frac{I_{dk}}{I_{qk}} \sin(\varphi_{qk} - \varphi_{dk}). \tag{134}$$

Пусковой момент двигателя при симметричной работе в абсолютных величинах

$$M_{п.н} = \frac{m_1 p}{2\pi f_1} I_{qk}^2 \frac{x_{mq}^2 r_{2q}^1}{r_{2q}^{12} + (x_{2q}^1 + x_{mq}^1)^2}. \tag{135}$$

Пусковой момент двигателя в однофазном режиме

$$M_п = \mu_п M_{п.н} = \frac{m_1 p}{2\pi f_1} k I_{dk} I_{qk} \sin(\varphi_{qk} - \varphi_{dk}) \frac{x_{mq}^2 r_{2q}^1}{r_{2q}^{12} + (x_{2q}^1 + x_{mq}^1)^2}. \tag{136}$$

При определении момента и параметров схем замещения принимается, что $m_1 = 2$. Максимальное значение пускового момента однофазного двигателя с симметричными обмотками при конденсаторном пуске

$$\mu_{\text{п max}} = \frac{\cos \varphi_k}{2(1 - \sin \varphi_k)} \tag{137}$$

имеет место при включении последовательно с одной из фаз емкостного сопротивления $x_c = \sqrt{r_k^2 + x_k^2}$. Отношение пусковой мощности (в вольтамперах) ОКД с двухфазными симметричными обмотками к пусковой мощности этого же двигателя при симметричном включении

$$p_{\text{п}} = \frac{UI_{\text{сети}}}{2UI_{dk}} = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{4 - 4\frac{x_c}{Z_{dk}}\sin\varphi_k + \left(\frac{x_c}{Z_{dk}}\right)^2}{1 - 2\frac{x_c}{Z_{dk}}\sin\varphi_k + \left(\frac{x_c}{Z_{dk}}\right)^2}}. \tag{138}$$

На рис. 13 показана зависимость $p_{\text{п}}$ от $\frac{x_c}{Z_{dk}}$. Когда пусковой момент однофазного двигателя равен пусковому моменту двигателя при симметричной работе ($\mu_{\text{п}} = 1, y_c = 0{,}63$, рис. 11), пусковая мощность однофазного двигателя несколько больше половины пусковой мощности двигателя при симметричном включении $\left(y_c = 0{,}63, \frac{x_c}{Z_{dk}} = \frac{1}{y_c} = 1{,}6,\ p_{\text{п}} = 0{,}55,\ \text{рис. } 13\right)$.

Графический метод расчета характеристик

Впервые графический метод расчета характеристик конденсаторных двигателей применил М. Крондль [23], построивший токи прямой и обратной составляющих и использовавший круговую диаграмму двигателя для расчета потребляемой и полезной мощности, мощности потерь, а также моментов от токов прямой и обратной составляющих.

При этом должны быть известны линии полезной мощности и моментов круговой диаграммы. Для двигателей с вытеснением тока построение таких линий затруднительно, легче аналитически вычислить интересующие величины, определив токи прямой и обратной составляющих ротора и статора.

Уравнения (94) — (105) для ОКД с несимметричными обмотками, сдвинутыми в пространстве на угол 90°, не могут быть решены простыми графическими построениями. Необходимо исключить из них параметры одной из фаз, например, вспомогательной фазы d. В соответствии с [35], заменим несимметричную машину симметричной. На параметры фаз d и q наложим такие условия:

$$Z_{d1} + Z_c = k^2 (Z_{q1} + Z_c^!), \tag{139}$$

$$Z_{d_2} + Z_c = k^2 (Z_{q2} + Z_c^1). \quad (140)$$

Действительная емкость, таким образом, заменена фиктивной Z_c^1, определяемой из соотношений

$$Z_c^1 = \frac{Z_c}{k^2} + \frac{Z_{d1}}{k^2} - Z_{q1} = \frac{Z_c}{k^2} + \frac{Z_{d2}}{k^2} - Z_{q2} . \quad (141)$$

Воспользовавшись этими подстановками и заменяя сопротивления проводимостями

$$y_c' = \frac{1}{Z_c'}; \quad y_{d1} = \frac{1}{Z_{d1}}; \quad y_{d2} = \frac{1}{Z_{d2}}; \quad y_{q1} = \frac{1}{Z_{q1}}; \quad y_{q2} = \frac{1}{Z_{q2}},$$

получаем уравнения для токов и напряжений фаз в таком виде:

$$\frac{\dot U_{q1}}{\dot U} = \frac{y_{q2} - y_c^1\left(\frac{j}{k} - 1\right)}{2y_c' + y_{q1} + y_{q2}}, \quad (142)$$

$$\frac{\dot U_{q2}}{\dot U} = \frac{y_{q1} - y_c'\left(-\frac{j}{k} - 1\right)}{2y_c' + y_{q1} + y_{q2}}, \quad (143)$$

$$\dot I_q = \dot U \frac{2y_{q1}y_{q2} + y_c'(y_{q1} + y_{q2}) + \frac{j}{k} y_c' (y_{q2} - y_{q1})}{2y_c' + y_{q1} + y_{q2}}, \quad (144)$$

$$I_d = \frac{U}{k^2} y_c^1 \frac{y_{q1}(jk + 1) + y_{q2}(1 - jk)}{2y_c' + y_{q1} + y_{q2}}, \quad (145)$$

$$\dot I_{q1} = \dot U y_{q1} \frac{y_{q2} - y_c'\left(\frac{j}{k} - 1\right)}{2y_c' + y_{q1} + y_{q2}}, \quad (146)$$

$$I_{q2} = \dot U y_{q2} \frac{y_{q1} - y_c'\left(-\frac{j}{k} - 1\right)}{2y_c' + y_{q1} + y_{q2}}. \quad (147)$$

Уравнения (142) — (147) можно выразить через токи. Для этого нужно умножить числитель и знаменатель на напряжение сети U Ранее было установлено, что двигатель вращается в направлении поля прямой последовательности. Поэтому, если мы имеем круговую диаграмму асинхронного двухфазного двигателя с симметричными обмотками,

$$\dot I_s = \dot U y_{q1}, \quad (148)$$

$$\dot{I}_{2-s} = \dot{U}y_{q2} \quad (149)$$

соответствуют скольжениям s и $2-s$.

Введем, кроме того, ток

$$\dot{I}'_c = \dot{U}y'_c. \quad (150)$$

Тогда относительные значения напряжений прямой и обратной последовательности фазы q могут быть представлены соотношениями

$$\overline{U}_{q1} = \frac{\dot{U}_{q1}}{\dot{U}} = \frac{\dot{b}}{2\dot{a}}, \quad (151)$$

$$\overline{U}_{q2} = \frac{\dot{U}_{q2}}{\dot{U}} = \frac{\dot{c}}{2\dot{a}}. \quad (152)$$

Вектор $\dot{a}$ определяется соотношением

$$\dot{a} = \dot{I}_п - (-\dot{I}'_c), \quad (153)$$

где

$$\dot{I}_п = \frac{1}{2}(\dot{I}_s + \dot{I}_{2-s}).$$

Векторы $\dot{b}$ и $\dot{c}$ определяются такими соотношениями:

$$\dot{b} = \dot{I}_{2-s} - \dot{I}'_c\left(\frac{j}{k} - 1\right), \quad (154)$$

$$\dot{c} = \dot{I}_s - \dot{I}'_c\left(-\frac{j}{k} - 1\right). \quad (155)$$

Токи прямой и обратной составляющих

$$\dot{I}_{q1} = \dot{I}_s\overline{U}_{q1}, \quad (156)$$

$$\dot{I}_{q2} = \dot{I}_{2-s}\cdot\overline{U}_{q2}. \quad (157)$$

Токи в фазах могут быть определены двумя способами: во-первых, как сумма комплексов токов прямой и обратной последовательности; во-вторых, на основании соотношений

$$\dot{I}_d = \frac{1}{k^2}\dot{I}'_c\frac{\dot{d}}{\dot{a}}, \quad (158)$$

$$\dot{I}_q = \dot{I}'_c\frac{\dot{q}}{\dot{a}} + \dot{I}_s\frac{\dot{I}_{2-s}}{\dot{a}} = \dot{I}'_q + \dot{I}''_q, \quad (159)$$

где

$$\dot{I}'_q = \dot{I}'_c\frac{\dot{q}}{\dot{a}}; \quad \dot{I}''_q = \dot{I}_s\frac{\dot{I}_{2-s}}{\dot{a}}, \quad (160)$$

$$\dot{d} = jk\frac{1}{2}(\dot{I}_s - \dot{I}_{2-s}) + \dot{I}_п; \quad (161)$$

$$\dot{q} = \frac{-j}{k}\frac{1}{2}(\dot{I}_s - \dot{I}_{2-s}) + \dot{I}_п.$$

Второй способ оказывается в некоторых случаях более удобным, так как позволяет упростить вычисление напряжений и токов прямой и обратной последовательности, которые при этом определяются только по модулю.

Моменты от токов прямой и обратной последовательности можно найти из соотношений

$$M_1 = M_s|\overline{U}_{q1}|^2, \quad (162)$$

$$M_2 = M_{2-s}|\overline{U}_{q2}|^2. \quad (163)$$

Результирующий момент

$$M = M_1 - M_2. \quad (164)$$

В уравнениях (162) — (164) напряжения прямой и обратной последовательности определяются только по модулю; поэтому для большей части расчетов не требуется определять фазовые углы токов прямой и обратной последовательности.

Графические построения в значительной мере облегчают как расчеты характеристик при известных параметрах двигателя, так и выбор отдельных параметров, например емкости и коэффициента мощности.

Определим величину емкости из условия, что при заданном скольжении обратное поле отсутствует. Согласно (152) и (155) необходимо, чтобы

$$\dot{I}_s = \dot{I}'_c\left(-\frac{j}{k} - 1\right). \quad (165)$$

Если ток I'_c — емкостный, а $\dot{I}_s$ — индуктивный, то (165) может быть записано в отрезках на осях в таком виде:

$$I_s\cos\varphi - jI_s\sin\varphi = (I'_{ca} + jI_{cp})\left(\frac{j}{k} - 1\right).$$

Решая это уравнение относительно тока I'_c, находим

$$I'_{ca} = \frac{kI_s}{1+k^2}(\sin\varphi - k\cos\varphi), \quad (166)$$

$$I'_{cp} = \frac{kI_s}{1+k^2}(k\sin\varphi + \cos\varphi). \quad (167)$$

Если

$$k = \operatorname{tg}\varphi,$$

то

$$I'_{ca} = 0;\ I'_{cp} = I_s \sin \varphi. \qquad (168)$$

Это означает, что можно достигнуть уравновешенного режима включением только емкостного сопротивления

При этом

$$x_c = \frac{U}{I_s} \cdot \frac{\sin \varphi}{\cos^2 \varphi}. \qquad (169)$$

Если сопротивления Z_d и Z_q не удовлетворяют соотношению $\frac{Z_d}{Z_q} = k^2$, то вычисленное таким образом значение x_c может быть полезным для предварительных расчетов.

Геометрические построения приводятся на рис. 14. Для общего случая несимметрии вектор I'_c имеем активную и реактивную составляющие и опережает вектор напряжения на угол, меньший 90°.

Откладываем вектор $-\dot{I}'_c$ и находим точку A. При этом $a = AT$, где точка T — средина отрезка EH, соединяющего концы векторов I_s и I_{2-s}.

Чтобы найти вектор $\dot{b}$, строим OL;

$$OL = \dot{I}'_c \left(\frac{j}{k} - 1 \right);$$

вектор $\dot{b} = LH$; вектор $\dot{c} = KE$.

Точка K определяется как конец вектора OK,

$$OK = \dot{I}'_c \left(\frac{-j}{k} - 1 \right).$$

Определяя разности векторов OA, OK, OL

$$OK - OA = -\dot{I}'_c \frac{j}{k}$$

и

$$OA - OL = -\dot{I}'_c \frac{j}{k},$$

находим, что точки K, A и L находятся на одной прямой, перпендикулярной OA. Точки K и L расположены на этой прямой на расстоянии $\frac{OA}{k}$ по обе стороны от точки A.

Отсюда следует возможность простых построений для нахождения точек K и L. Через конец вектора $OA = -I'_c$ проводим перпендикуляр и откладываем по обе стороны от точки A отрезки $\frac{OA}{k}$. Концы этих отрезков дают точки K и L.

Вектор $\dot{d}$ — сумма векторов $\dot{I}_п$ и TD;

$$TD = jk\frac{\dot{I}_s - \dot{I}_{2-s}}{2}.$$

Для нахождения $\dot{q}$ к вектору $\dot{I}_п$ пристраиваем вектор

$$TQ = \frac{-j}{k}\cdot\frac{\dot{I}_s - \dot{I}_{2-s}}{2}$$

и находим их сумму.

Главные затруднения, возникающие при графическом расчете характеристик, заключаются в правильном отсчете углов. Уни-

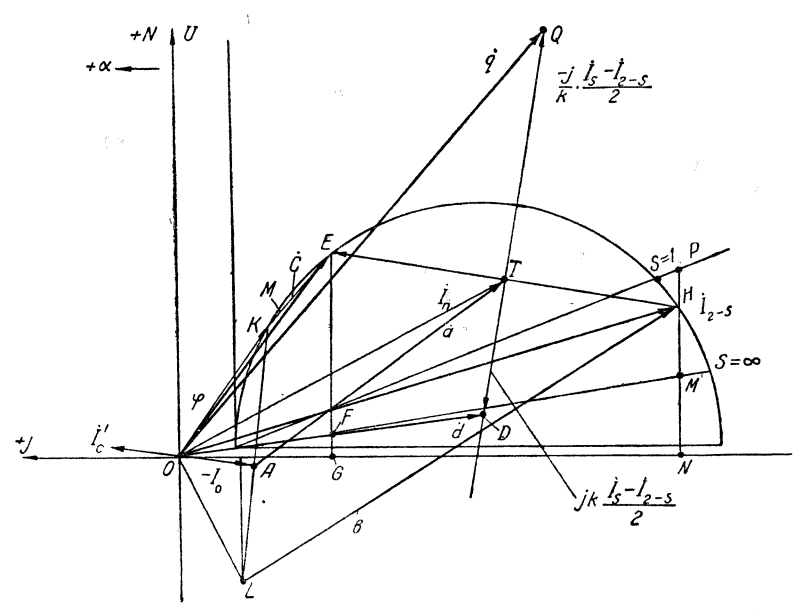


Рис. 14. Графические построения для определения векторов *a*, *b*, *c*, *d*, *q*.

версальные чертежные столы несколько уменьшают эти трудности.

Графический метод используется для расчета токов фаз и моментов несимметричных двухфазных машин. После построения круговой диаграммы момент двигателя определяется по равенству

$$M = m_\mu (EF\,|\bar{U}_{q1}|^2 - HM\,|\bar{U}_{q2}|^2). \tag{170}$$

здесь EF (см. рис. 14) — момент при скольжении s; HM — момент при скольжении $2-s$;

$$m_\mu = \frac{m_1 U p m_i}{\omega 9{,}81}\;[кгм/мм], \tag{171}$$

где m_p — масштаб моментов; m_i — масштаб токов [*а/мм*]; $m_1 = 2$ — число фаз статора двигателя; p — число пар полюсов; $\omega = 2\pi f = 314 \frac{1}{сек}$.

Полезная мощность при заданной скорости определяется соотношением $P_2 = M\omega \cdot 9{,}81$ [*вт*],
где

$$\omega = (1 - s)\frac{2\pi f}{p}. \tag{172}$$

Потребляемую мощность выразим через результирующий ток сети и коэффициент мощности

$$P_1 = UI_{сети} \cos \varphi_{сети} \tag{173}$$

или по балансу мощности

$$P_1 = P_2 + \Sigma p. \tag{174}$$

Только для двухфазных симметричных машин потребляемая мощность может быть определена непосредственно из круговой диаграммы [23] по соотношению

$$P_1 = m_p [EG |\bar{U}_{q_1}|^2 + NH |\bar{U}_{q_2}|^2], \tag{175}$$

где $m_p = mUm_i$ [*вт/мм*] — маштаб мощностей; EG и HN — активные составляющие токов I_s и I_{2-s}.

Потери в стали статора могут быть вычислены по соотношению

$$p_{ст} = p_{ст.н} (|\bar{U}_{q1}|^2 + |\bar{U}_{q2}|^2), \tag{176}$$

где $p_{ст.н}$ — потери в стали при номинальном напряжении и симметричной работе двигателя. Потери в стали ротора могут быть определены методом Ю. С. Чечета [44].

Потери в меди статора определяются через действительные токи в фазах

$$p_{Cu\,d} = I_d^2 r_d, \tag{177}$$

$$p_{Cu\,q} = I_q^2 r_q, \tag{178}$$

$$p_{Cu\,1} = p_{Cu\,d} + p_{Cu\,q}. \tag{179}$$

Потери в меди ротора можно определить через сопротивления и токи ротора прямой и обратной последовательности, приведенные к фазе d или q.

От токов прямой последовательности

$$p_{Cu\,2\,пр} = m_1 r'_{2q\,пр} I_{rq1}^2. \tag{180}$$

Здесь

$$I_{rq1}^2 = \frac{I_{q1}^2 x_{mq}^2}{\left(\frac{r'_{2q\,пр}}{s}\right)^2 + (x_{mq} + x'_{2q\,пр})^2}; \tag{181}$$

$x'_{2q\,пр}$ и $r'_{2q\,пр}$ — приведенные к фазе q сопротивления ротора с учетом вытеснения тока; x_{mq} — сопротивление взаимной индукции, приведенное к фазе q.

Потери в меди ротора от токов обратной последовательности

$$p_{Cu\,2\,об} = m_1 r'_{2q\,об} I^2_{rq2}. \qquad (182)$$

Здесь

$$I^2_{rq2} = \frac{I^2_{q2} x^2_{mq}}{\left(\frac{r'_{2q\,об}}{2-s}\right)^2 + (x_{mq} + x'_{2q\,об})^2}. \qquad (183)$$

Потери в меди статора симметричного двигателя вычисляются проще:

$$p_{Cu1} = m_1 r_1 (I_1^2 + I_2^2). \qquad (184)$$

Известно, что для получения действительных механических и токовых характеристик асинхронных двигателей при больших скольжениях и симметричном включении необходимо учитывать изменение параметров двигателя в связи с насыщением.

ОКД не является исключением. Трудности здесь заключаются в том, что в основу расчета положен метод симметричных координат, который исходит из линейности магнитной цепи.

Насыщение могло быть учтено, если бы были известны при данной скорости вращения токи в обмотках статора и ротора, которые отличаются от токов при симметричной работе и той же скорости вращения.

В первом приближении за исходные данные для расчета механических характеристик при больших скольжениях можно принять параметры двигателя при коротком замыкании, определение которых опытным или расчетным путем не вызывает затруднений.

Для двигателя МА 93-41/4К (мощность 44 *квт*, $m_1 = 2$, $U_н = 2500\,в$) с симметричными обмотками статора опытные данные таковы:

$$Z_k = \frac{U}{I_k} = \frac{2520}{180} = 13{,}9 \text{ ом}, \qquad r_к = 5{,}73 \text{ ом}, \quad x_к = 12{,}6 \text{ ом}.$$

Диаметр круга токов

$$D = \frac{U}{x_k} = \frac{2500}{12{,}6} = 198 \text{ а}.$$

Ток холостого хода

$$I_0 = 9{,}95 \text{ а}.$$

Углы линий электромагнитной и полезной мощностей

$$\operatorname{tg}\psi_1 = \frac{r_1}{x_к} = \frac{2{,}65}{12{,}6} - 0{,}21,$$

s	a, мм	a, $-\psi_d$, град	b, мм	c, мм	d, мм	d, $-\psi_d$, град	q, мм	q, $-\psi_q$, град
0	183,4	70,3	379	24	281,6	113,9	273,5	29,6
0,0176	187,8	66,8	378,7	2	266	112,2	289	30,4
0,03	192,7	64,8	378,6	15,8	257,3	111	299,3	31,3
0,06	206	60,7	378,5	53,7	237,5	106,7	322,7	33,7
0,10	225,7	57,7	378	98,3	221,3	99,3	347,5	37
0,15	249,5	56	377,6	145	217,7	90	370	41
0,20	270,6	55,8	377,3	183,3	226	82,2	385,3	44,7
0,30	301	57,3	376	236,8	255	73,3	400	50,6
0,40	320,6	59	375	271,8	284,5	69,4	403	55
0,50	333	60,4	373,8	294	308	67,7	402	58,1
0,60	341	61,5	372,2	310	326,5	66,9	398	60,3
0,70	346,3	62,4	370,6	321,8	341,5	66,5	393	62,1
0,80	349	62,9	368,5	330	354	66,1	387	63,3
0,90	350,7	63,3	366	336,5	364,2	65,5	380	64,3
1,00	351,2	63,4	362,8	341,5	372,5	65	372,5	65

s	$\bar{U}=\frac{b}{2a}$	$\bar{U}_1^2$	$\bar{U}_2=\frac{c}{2a}$	$\bar{U}_2^2$	I_d: $I_c=\frac{d}{a}$	I_d: φ_d, град	I'_q: $I_c\frac{q}{a}$	I'_q: φ_q, град	$I''_q = \frac{I_s I_{2-s}}{a}$
0	1,032	1,064	0,0654	0,00428	36	46,4	35	130,1	41,7
0,0176	1,008	1,016	0,0053	0,000028	33,3	44,6	36,2	126,4	69,0
0,03	0,983	0,969	0,041	0,00168	31,4	43,8	36,6	123,5	94
0,06	0,918	0,845	0,130	0,0170	27,1	44,0	36,9	117	160
0,10	0,838	0,702	0,218	0,0476	23,1	48,4	36,5	110,7	225
0,15	0,757	0,573	0,29	0,0845	20,55	56	35	105	278
0,20	0,698	0,487	0,339	0,115	19,65	63,6	33,5	101,1	312,5
0,30	0,627	0,392	0,394	0,155	19,95	14	31,3	96,7	350
0,40	0,585	0,343	0,423	0,180	20,9	19,6	29,6	94	362
0,50	0,562	0,315	0,442	0,195	21,8	82,7	28,5	92,3	379
0,60	0,547	0,298	0,455	0,207	22,55	84,6	27,5	91,2	386
0,70	0,536	0,287	0,464	0,216	23,2	85,9	26,7	90,3	390
0,80	0,528	0,279	0,473	0,227	23,9	86,8	26,1	89,6	394
0,90	0,522	0,273	0,48	0,23	24,5	87,8	25,5	89	396
100	0,517	0,267	0,487	0,237	25	88,4	25	88,4	396

$$\operatorname{tg}\psi_2 = \frac{r_k}{x_k} = \frac{5,73}{12,6} = 0,457.$$

Масштабы токов, мощностей, моментов таковы:

$$m_i = 0,5\ a/мм,\quad m_p = 2\cdot\frac{1}{2}\cdot 2500 = 2500\ вт/мм,$$

Таблица 11

I_s,		I_{2-s},		M_s,		M_{2-s},		n, об/мин
мм	φ_s, *град*	*мм*	φ_{2-s}, *град*	*мм*	*кгм*	*мм*	*кгм*	
19,5	90	392,2	71,5	0	0	50,8	82,5	1500
33,5	44,5	392,1	71,4	23,9	38,7	51,3	83,25	1475
46,3	31,3	392	71,4	38,5	62,4	51,6	83,7	1455
84	24,8	392	71,4	72,8	118	52,3	85	1412
129,5	26,4	391,3	71,2	108	175	53,2	86,2	1350
177,3	31	390,5	71	137	222	55	89,2	1275
216,5	35,8	390,3	70,8	153,2	248	56	90,7	1200
270,5	43,7	389	70,3	160,8	261	59	95,6	1050
305	49,7	387,7	69,9	153,4	249	62,2	100,8	900
327	54	386	69,3	141,5	229,5	65,8	106,8	750
342,6	57,3	384,3	68,7	129,2	209	70	113,5	600
354	60	382	68	117,8	191	74,3	120,5	450
362	62	379,8	67,1	107,8	174,6	79,4	128,8	300
368	63,7	376,5	66,2	99	160,5	85,3	138,4	150
372,5	65	372,5	65	91,8	149	91,8	149	0

Таблица 12

φ_q'', *град*	I_q,		$I_{сети}$,		$M_{пр}$, *кгм*	$M_{об}$, *кгм*	$M_{рез}$, *кгм*	I_d, *а*	I_q, *а*
	мм	φ_q, *град*	*мм*	φ_c, *град*					
—91,2	27,8	—147,5	11	+82,2	0	0,353	—0,353	18	13,9
—49,1	34	—45	48	— 1	39,25	0,00234	39,25	16,6	17
—37,9	60,6	—26,7	77	— 4,1	61,3	0,141	61,16	15,7	30,3
—35,5	128,3	—28	141,3	—15,7	99,7	1,45	98,35	13,55	64,2
—39,9	194,3	—34,7	198,5	—28	123	4,1	118,9	11,55	97,2
—47	247,7	—43,8	245	—39	127,5	7,53	120	10,3	123,6
—50,8	283,2	—47,7	277	—43,9	120,5	10,4	110,1	9,83	141,5
—56,7	322,5	—54	310,5	—51,2	102	14,8	87,2	10	161
—60,6	336	—58	321	—55,5	85,1	18,15	67	10,45	168
—62,9	353,2	—61	336	—58,7	72,2	20,8	51,4	10,9	176
—64,5	361,2	—62,8	342,5	—60,7	62,3	23,5	38,8	11,3	180
—65,6	366	—63,8	346,2	—61,9	54,8	26	28,8	11,6	183
66,2	370	—64,7	349,2	—62,8	48,7	30,5	18,2	11,95	185
—66,6	373	—65	351,5	—63,2	43,8	31,8	12,0	12,25	186,5
—66,6	372,5	—65	368	—66,7	39,8	35,3	4,5	12,5	186

$$m_\mu = \frac{2500 \cdot 2}{314 \cdot 9{,}81} = 1{,}62 \ \textit{кгм/мм}.$$

Рабочая емкость двигателя равна 15 *мкф*,

$$I_c = j\omega CU = j314 \cdot 15 \cdot 10^{-6} \cdot 2500 = j11{,}78 \ a,$$

$$OA = \frac{I_c}{m_i} = \frac{11{,}78}{0{,}5} = 23{,}5 \ \textit{мм}.$$

Результаты вычислений сведены в табл. 11 и 12. Механические и токовые характеристики двигателя приведены на рис. 15. Они показывают, что совпадение опытных и расчетных

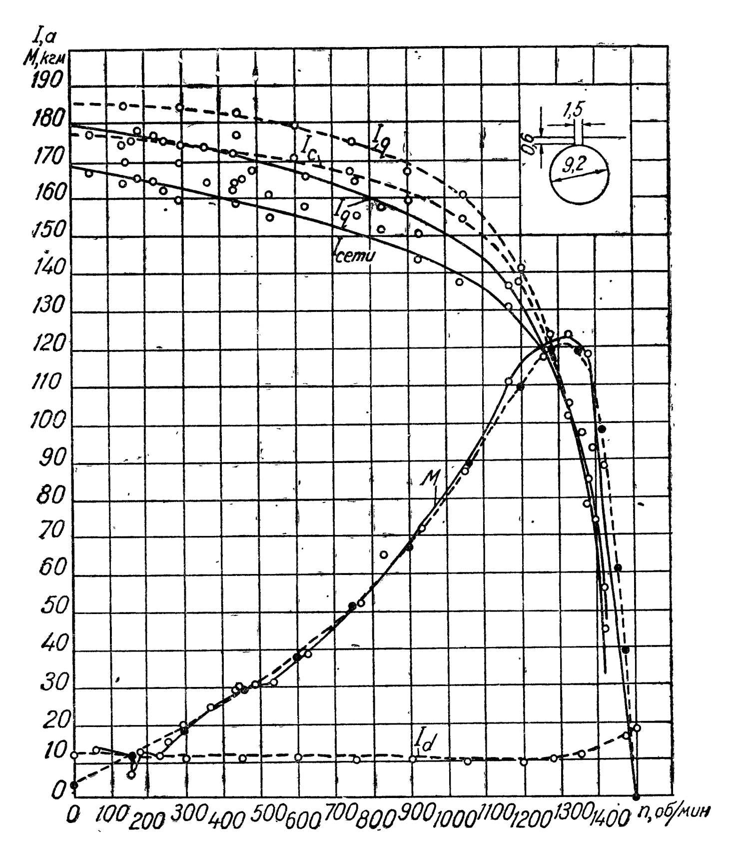


Рис. 15. Механические и токовые характеристики двигателя МА 93-41/4К при $C=15$ *мкф*, $U=2500$ *в*, $Z_2=40$, стержни медные, неизолированные, диаметр 9,0 *мм*

данных удовлетворительно для больших скольжений. Для рабочих скольжений опытные данные несколько меньше. Такой характер изменения токов имеет место и в симметричных асинхронных двигателях. Для улучшения сходимости результатов необходимо, по-видимому, вести расчеты для двух значений параметров, соответствующих номинальной скорости и короткому замыканию.

Графический способ имеет еще и такое преимущество перед аналитическим, как возможность наглядного самоконтроля. Для сложных расчетов это очень важно.

Выбор емкости из условий равенства токов фаз

При использовании трехфазных двигателей в качестве однофазных по описываемой схеме емкость, включаемая в фазу d, выбирается, как правило, не из условий получения уравновешенного режима. В последнем ток в одной из фаз должен быть больше, чем в другой, в $\sqrt{3}$ раза. Одна из фаз неизбежно перегревается, двигатель преждевременно выходит из строя. Более рационально выбирать емкость из условия, чтобы токи фаз равнялись номинальному току.

Определение из этого условия емкости связано со значительными трудностями. Можно ограничиться первым требованием, чтобы при номинальном скольжении токи фаз были равны. Опыт показывает, что это требование дает удовлетворительные результаты при выборе рабочей емкости для трехфазных двигателей при параллельном включении главной и вспомогательной обмоток. При этом соотношения для определения емкости приобретают более простой вид.

Приравнивая модули токов фаз d, и q, получаем согласно (96) и (99)

$$|k(Z_{q2}-Z_{q1})+j(Z_{d2}+Z_{d1})+j2Z_c|=\left|\frac{Z_{d1}-Z_{d2}}{k}+j(Z_{q1}+Z_{q2})\right|.$$

Отсюда при

$$Z_{d1}=r_{d1}+jx_{d1};\ Z_{d2}=r_{d2}+jx_{d2},$$
$$Z_{q1}=r_{q1}+jx_{q1};\ Z_{q2}=r_{q2}+jx_{q2};$$
$$Z_c=-jx_c$$

находим $(kr_{q1}-kr_{q2}+x_{d2}+x_{d1}-2x_c)^2+(kx_{q2}-kx_{q1}+r_{d2}+r_{d1})^2=$

$$=\left(\frac{r_{d2}}{k}-\frac{r_{d1}}{k}+x_{q1}+x_{q2}\right)^2+\left(\frac{x_{d1}}{k}-\frac{x_{d2}}{k}+r_{q1}+r_{q2}\right)^2.$$

Величина емкостного сопротивления определяется соотношением

$$x_c=\frac{1}{2}\Bigg[kr_{q1}-kr_{q2}+x_{d2}+x_{d1}\pm$$
$$\pm\sqrt{\left(\frac{r_{d2}}{k}-\frac{r_{d1}}{k}+x_{q1}+x_{q2}\right)^2+\left(\frac{x_{d1}}{k}-\frac{x_{d2}}{k}+r_{q1}+r_{q2}\right)^2-(kx_{q2}-kx_{q1}+r_{d2}+r_{d1})^2}\Bigg].\qquad(185)$$

Вводя обозначения

$$\zeta=\frac{Z_{d1}}{Z_{q1}},\qquad \beta_d=\frac{Z_{d2}}{Z_{d1}},\qquad \beta_q=\frac{Z_{q2}}{Z_{q1}},$$

находим отношение

$$\frac{2x_c}{Z_{q1}}=k\cos\varphi_{q1}-k\beta_q\cos\varphi_{q2}+\xi\beta_d\sin\varphi_{d2}+\xi\sin\varphi_{d1}\pm$$

Тип двигателя	$P_н$, *квт*	$U_{н.ф.}$, *в*	$I_н$, *а*	$S_н$, %	$Z_н$, *ом*	$\cos\varphi_н$	$K_i = \frac{I_п}{I_н}$	$\cos\varphi_2$
А 41-6	1,0	220	2,8	7	78,6	0,72	4,0	0,50
А 42-6	1,7	220	4,3	7	51,2	0,75	4,5	0,45
А 41-4	1,7	220	3,8	5,33	57,9	0,83	4	0,47
А 42-4	2,8	220	6,1	5,33	36,1	0,84	4,53	0,437
МА 142-1/8	2,7	220	7,3	4,0	30,1	0,7	5,0	0,467
МА 142-1/6	3,8	220	8,9	4	24,7	0,77	3,44	0.422

$$\pm\sqrt{\begin{gathered}\left(\frac{\xi\beta_d}{k}\cos\varphi_{d2} - \frac{\xi}{k}\cos\varphi_{d1} + \sin\varphi_{q1} + \beta_q\sin\varphi_{q2}\right)^2 + \\ + \left(\frac{\xi}{k}\sin\varphi_{d1} - \frac{\xi\beta_d}{k}\sin\varphi_{d2} + \cos\varphi_{q1} + \beta_q\cos\varphi_{q2}\right)^2 - \\ - (k\beta_q\sin\varphi_{q2} - k\sin\varphi_{q1} + \xi\beta_d\cos\varphi_{d2} + \xi\cos\varphi_{d1})^2.\end{gathered}}$$

Приближенно можно принять

$$\varphi_{d1} = \varphi_{q1},\ \varphi_{d2} = \varphi_{q2},\ \xi = k^2,\ \beta_d = \beta_q = \beta = \frac{1}{k_i} = \frac{I}{I_п}.$$

Тогда

$$\frac{2x_c}{Z_{q1}} = k\cos\varphi_1 - k\beta\cos\varphi_2 + k^2\beta\sin\varphi_2 + k^2\sin\varphi_1 \pm$$
$$\pm\sqrt{\begin{gathered}(k\beta\cos\varphi_2 - k\cos\varphi_1 + \sin\varphi_1 + \beta\sin\varphi_2)^2 + \\ + (k\sin\varphi_1 - k\beta\sin\varphi_2 + \cos\varphi_1 + \beta\cos\varphi_2)^2 - \\ - (k\beta\sin\varphi_2 - k\sin\varphi_1 + k^2\beta\cos\varphi_2 + k^2\cos\varphi_1)^2.\end{gathered}} \quad (186)$$

Пример. Для двигателя типа МА 142-1/8 (мощность 2,7 *квт*, $I_н = 7{,}3$ *а*, $U_{н.ф} = 220$ *в*) найдем

$$\cos\varphi_1 = 0{,}7,\ \sin\varphi_1 = 0{,}714,\ \cos\varphi_2 = 0{,}45,\ \sin\varphi_2 = 0{,}89,\ \beta = 0{,}2.$$

При $k = \frac{w_d k_{d1}}{w_q k_{q1}} = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0{,}578$ и $k^2 = 0{,}333$ получаем

$$k\beta = 0{,}116,\ k^2\beta = 0{,}0666,\ Z_{q1} = \frac{2\cdot 220}{7{,}3} = 60{,}2\ ом,$$

Таблица 13

$\beta=\frac{Z_2}{Z_н}$	$K=\frac{w_d k_{d_1}}{w_q k_{q_1}}$	Z_{q_1}, *ом*	$\frac{X_c}{Z_q}$	$C_{расч}$, *мкф*	Данные опыта				Напряжение однофазной сети, *в*
					C_p, *мкф*	$\bar{I}_d$, *а*	$\bar{I}_q$, *а*	s, %	
0,25	$\frac{1}{\sqrt{3}}$	157	0,947	21,5	19,15	1,0	1,0	4,2	380
0,222	$\frac{1}{\sqrt{3}}$	102	0,967	32	—	—	—	—	380
0,233	$\sqrt{3}$	57,9	1,89	29,1	27,7	1,014	1,025	2,90	220
0,21	$\frac{1}{\sqrt{3}}$	72,2	0,922	47,8	43,8	0,895	1,09	4,46	380
0,2	$\frac{1}{\sqrt{3}}$	60,2	0,935	56,4	54	0,973	1,12	2,85	380
0,267	$\frac{1}{\sqrt{3}}$	49,4	0,946	68,2	—	—	—	—	380

$$\frac{2x_c}{Z_{q1}} = 0{,}578\cdot 0{,}7 - 0{,}116\cdot 0{,}45 + 0{,}0666\cdot 0{,}89 + 0{,}333\cdot 0{,}714 \pm$$

$$\pm\sqrt{\begin{array}{l}(0{,}116\cdot 0{,}45 - 0{,}578\cdot 97 + 0{,}714 + 0{,}2\cdot 0{,}89)^2 + \\ + (0{,}578\cdot 0{,}714 - 0{,}116\cdot 0{,}89 + 0{,}7 + 0{,}2\cdot 0{,}45)^2 - \\ - (0{,}116\cdot 0{,}89 - 0{,}578\cdot 0{,}714 - 0{,}333\cdot 0{,}45 + 0{,}333\cdot 0{,}7)^2\end{array}} =$$

$$= 0{,}615 \pm \sqrt{0{,}539^2 + 1{,}1^2 - 0{,}073^2} = 0{,}65 \pm 1{,}22,$$

$$\frac{x_c}{Z_{q1}} = \frac{1}{2}(0{,}65 + 1{,}22) = 0{,}935,\ x_c = 56{,}4\ \textit{ом},\ C = 56{,}4\ \textit{мкф}.$$

В (186) перед корнем принимается знак плюс.

При использовании только емкостного сопротивления равенство токов фаз может быть достигнуто не при всяких значениях $\cos\varphi_1$. На это указывают мнимые корни в формуле (186). Приближенно емкостное сопротивление можно определить и в этом случае через модуль правой части (186). В табл. 13 приводятся данные расчетов рабочей емкости по формуле (186) для двигателей серии *А*.

Сравнение с опытными данными показывает удовлетворительное совпадение результатов. Опытные значения емкости получены подбором при нагрузке ОКД и относительных значениях токов фаз $\bar{I}_d$ и $\bar{I}_q$, близких к единице.

Скольжения двигателя при этом меньше номинального. Полезная мощность ОКД составляет примерно 80% номинальной мощности трехфазного двигателя.

Характеристики ОКД при переменном сопротивлении в цепи ротора

ОКД выполняются, как правило, с короткозамкнутым ротором. Не исключена, однако, возможность применения их с фазным ротором, например, для привода электротракторов, электровозов.

Характер изменения токов и моментов симметричного асинхронного двигателя при переменном сопротивлении в цепи ротора изучен хорошо; для ОКД этот вопрос разработан недостаточно. Сложность аналитических соотношений не позволяет получить некоторые важные зависимости, известные для асинхронных двигателей при симметричной работе.

Для изучения характеристик ОКД при изменении сопротивления в цепи ротора используем графо-аналитический метод, при этом рассмотрим однофазный двигатель с симметричными обмотками статора, параметры которого при симметричной работе таковы: $r_1=3{,}0$ *ом*, $x_1=9{,}95$ *ом*, $r_2'=3{,}3$ *ом*, $x_2'=6{,}1$ *ом*, $x_m=226$ *ом*.

Основные расчетные данные двигателя МА 93=41/4К: $P=$ $=44$ *квт*, $I_{dн}=I_{qн}=15$ *а*, $m_1=2$, $U_н=2500$ *в*, $2p=4$, рабочая емкость $C=15$ *мкф*, включение обмоток параллельное.

Моменты рассчитаны для первой основной гармоники магнитного поля, высшими гармониками при этом пренебрегли. Механические и токовые характеристики двигателя МА 93-41/4 К при $C=15$ *мкф* приведены на рис. 16 при сопротивлениях ротора $r_2'=3{,}3$ и 33 *ом*.

На рис. 17 приведены характеристики для сопротивлений ротора до $r_2'=82{,}5$ *ом*, что в 25 раз больше номинального. Чем больше сопротивление ротора, тем больше пусковой момент при рабочей емкости. Максимальный момент с увеличением сопротивления ротора уменьшается, а скольжение, соответствующее этому моменту, увеличивается.

При тех же сопротивлениях роторной цепи пусковые и максимальные моменты выше при большей емкости. Токи, потребляемые двигателем из сети при пуске, при $C=20$ *мкф* меньше, чем при $C=15$ *мкф* (рис. 18).

Чем больше активное сопротивление в цепи ротора, тем меньше значение токов фаз и пусковой ток сети.

При сопротивлениях, для которых $M_{max}=M_п$, и рабочей емкости в цепи статора пусковой ток в два раза больше номинального. При увеличении емкости пусковой ток уменьшается, а пусковой момент увеличивается. Поэтому ОКД с фазным ротором могут удовлетворить разнообразным требованиям привода. Для отдельных случаев можно ограничиться только рабочей емкостью, создавая значительный пусковой момент путем повышения сопротивления в цепи ротора.

На рис. 19, 20 приведены кривые потерь и полезной мощности двигателя в функции скольжения при $r_2' = 3{,}3$ и 9,9 *ом*. Повышение сопротивления в цепи ротора приводит к увеличению скольжения, при котором отсутствует обратная составляющая поля двигателя. В связи с этим потери в меди минимальны при скольжениях тем больших, чем больше активное сопротивление ротора. Потери в меди минимальны при $r_2' = 3{,}3$ *ом* и $s = 1\%$; при $r_2' = 6{,}6$ *ом* и $s = 2\%$; при $r_2' = 13{,}2$ *ом* и $s = 3{,}5\%$.

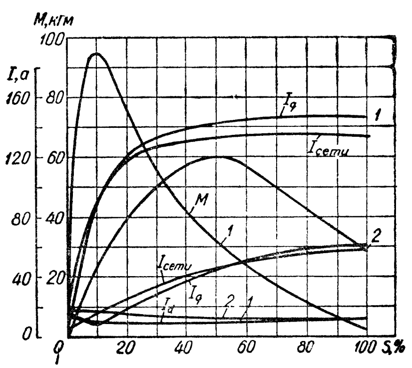


Рис. 16. Характеристики двигателя МА 93-41/4К при $C = 15$ *мкф*.
$1 - r'_2 = 3{,}3$ *ом*, $2 - r'_2 = 33$ *ом*.

Абсолютная величина минимума с увеличением сопротивления возрастает. При увеличении r_2' в два раза (с 3,3 до 6,6 *ом*) суммарные потери в меди увеличиваются с 1,8 до 2,3 *квт*. При увеличении сопротивления до 13,2 *ом* минимум суммарных потерь увеличивается до 3 *квт*. При этом минимум потерь в меди ротора изменяется пропорционально сопро-

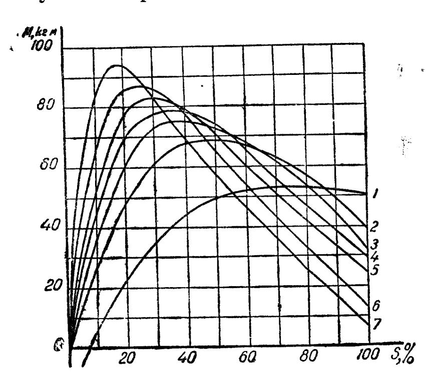


Рис. 17. Механические характеристики двигателя МА 93-41/4К при $C = 20$ *мкф*:
$1 - r'_2 = 82{,}5$ *ом*; $2 - r'_2 = 29{,}7$ *ом*; $3 - r'_2 = 23{,}1$ *ом*; $4 - r'_2 = 19{,}8$ *ом*; $5 - r'_2 = 13{,}2$ *ом*; $6 - r'_2 = 9{,}9$ *ом*; $7 - r'_2 = 6{,}6$ *ом*.

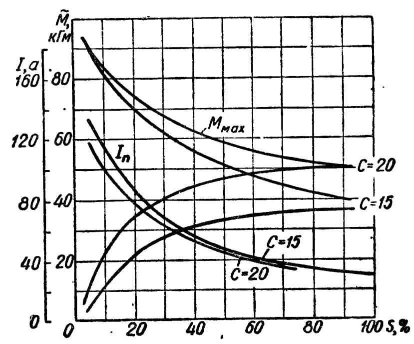


Рис. 18. Зависимость максимального и пускового момента и пускового тока от r'_2 при $C = 15$ и 20 *мкф*.

тивлению. В статоре же они мало зависят от величины активного сопротивления ротора. Потери в стали статора показаны в процентах номинальных потерь. Вследствие резонансных явлений при $S = 0$ напряжение конденсаторной фазы резко увеличивается, что вызывает увеличение магнитного потока и потерь в стали статора при малых скольжениях.

На рис. 21 и 22 приведены годографы токов I_d, I_q и $I_{сети}$. Их рассмотрение показывает, что величина тока, при котором

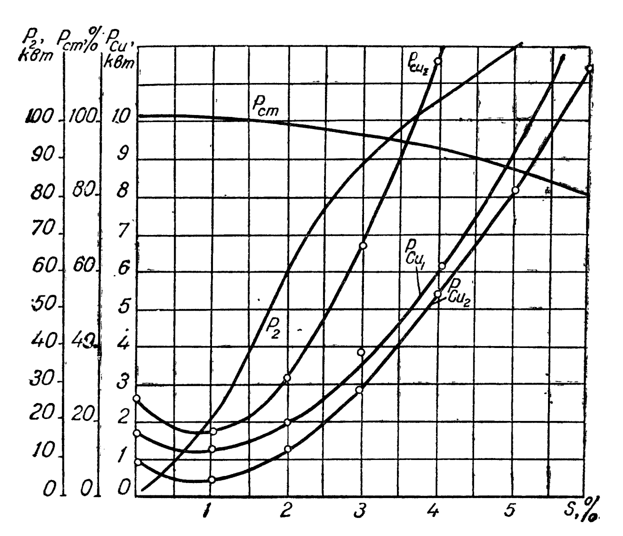


Рис. 19. Зависимость потерь и полезной мощности от скольжения при $C = 15$ *мкф* и $r^1{}_2 = 3{,}3$ *ом.*

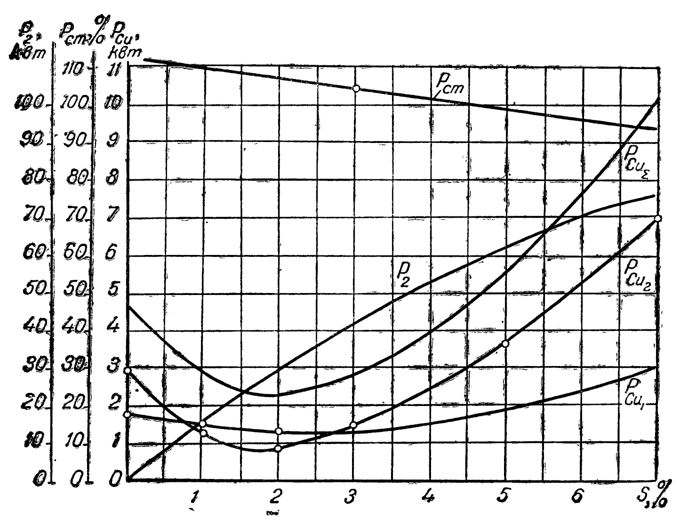


Рис. 20. Зависимость потерь и полезной мощности от скольжения при $C = 15$ *мкф* и $r^1{}_2 = 9{,}9$ *ом.*

$\cos\varphi = 1$, при заданной емкости изменяется мало. Скольжение, при котором $\cos\varphi_{сети} = 1$, возрастает при увеличении активного

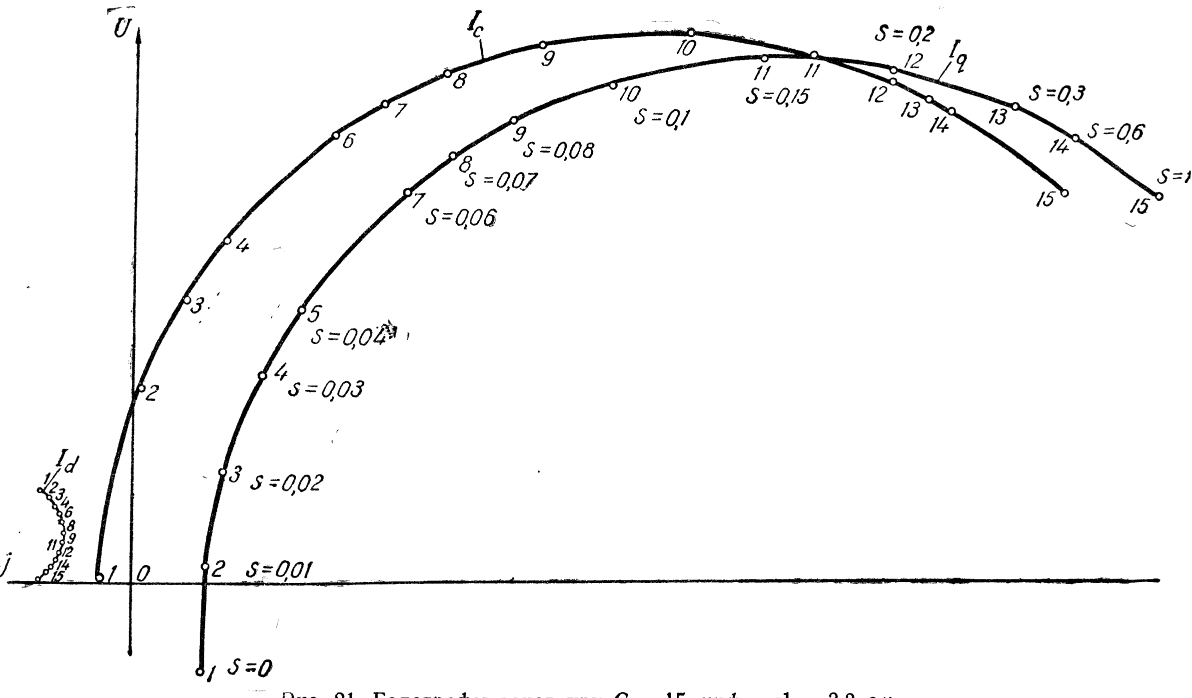


Рис. 21. Годографы токов при $C = 15$ *мкф* и $r^1_2 = 3{,}3$ *ом.*

сопротивления. При постоянной емкости все годографы являются как бы частью годографов токов при наименьшем сопротивлении ротора.

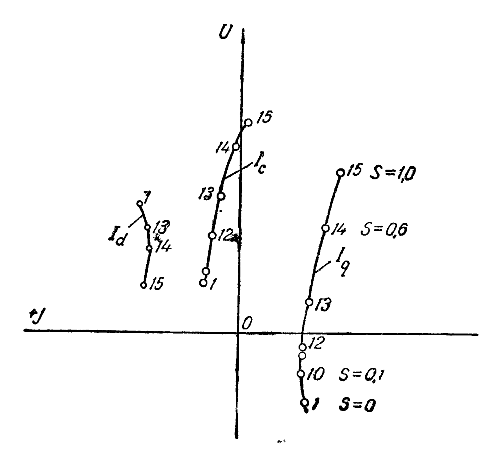


Рис. 22. Годографы токов при $C = 15$ *мкф* и $r^1{}_2 = 100$ *ом*.

Использование трехфазных двигателей в качестве ОКД при параллельном включении обмоток статора

Использование в качестве ОКД трехфазных двигателей имеет важное значение. Однако далеко не все они могут быть использованы. Большое влияние оказывают высшие гармоники [43, 46, 70], вытеснение тока в роторе [71] и соответствие номинальных напряжений двигателя и сети.

Рассчитать пусковые и рабочие характеристики при вытеснении тока в роторе с учетом влияния высших гармоник затруднительно. Серийные асинхронные двигатели малой мощности выпускаются, как правило, с вытеснением тока в роторе и с диаметральной обмоткой статора. Механические характеристики ОКД не всегда приемлемы. Поэтому опытное исследование представляет значительный интерес. На рис. 23—35 приведены результаты экспериментальных исследований двигателей МА 142-1/8, А42-4, А41-6, АОЛ31-4М.

Основные данные исследований сведены в табл. 14. Общий характер изменения вращающего момента двигателя от скорости вращения ротора при постоянной величине емкости неблагоприятен. При постоянной емкости уравновешенный режим может быть только при одной какой-нибудь скорости. При других же вращающий момент определяется как разность моментов от прямого и обратного полей основной гармоники. Паразитные асинхронные моменты от высших гармоник поля суммируются. В кривой моментов появляется провал, препятствующий

Рис. 23. Характеристики двигателя МА 142-1/8 при параллельном включении обмоток

($\lambda_d=1/3$, $\lambda_q=2/3$, $C=54$ *мкф*, $U_н=380$ *в*, $I_н=7,3$ *а*, $P_н=2,7$ *квт*, $M_н=3,66$ *кгм*, $n_с=750$ об/мин); *1*—$\bar{M}$; *2*—$\bar{U}_c$; *3*—$\bar{U}_d$; *4*—$\bar{I}_{сети}$; *5*—$\bar{I}_d$; *6*—$\bar{I}_1$.

Рис. 24. Рабочие характеристики двигателя МА 142-1/8 при параллельном включении обмоток

($\lambda_d=1/3$, $\lambda_q=2/3$, $C=54$ *мкф*, $U_н=380$ *в*, $I_н=7,3$, $P_н=2,7$ *квт*, $M_н=3,66$ *кгм*, $n_с=750$ об/мин).

Рис. 25. Характеристики двигателя МА 142-1/8 при параллельном включении обмоток

($\lambda_d = 1/3$, $\lambda_q = 2/3$, $C = 200{,}9$ *мкф*, $U_н = 380$ *в*; $I_н = 7{,}3$ *а*, $P_н = 2{,}7$ *квт*, $M_н = 3{,}66$ *кгм*, $n_с = 750$ об/мин): *1*—$\overline{M}$; *2*—$\overline{U}_c$; *3*—$\overline{U}_d$; *4*—$\overline{I}_{сети}$; *5*—$\overline{I}_d$; *6*—$\overline{I}_q$.

Рис. 26. Характеристики двигателя А 42-4 при параллельном включении обмоток

($\lambda_d = 1/3$, $\lambda_q = 2/3$, $C = 36{,}7$ *мкф*, $U_н = 380$ *в*, $P_н = 2{,}8$ *квт*, $I_н = 6{,}1$ *а*, $M_н = 1{,}92$ *кгм*, $n_с = 1500$ об/мин): *1*—$\overline{M}$; *2*—$\overline{U}$с; *3*—$\overline{U}_d$; *4*—$\overline{I}_{сети}$; *5*—$\overline{I}_d$; *6*—$\overline{I}_q$.

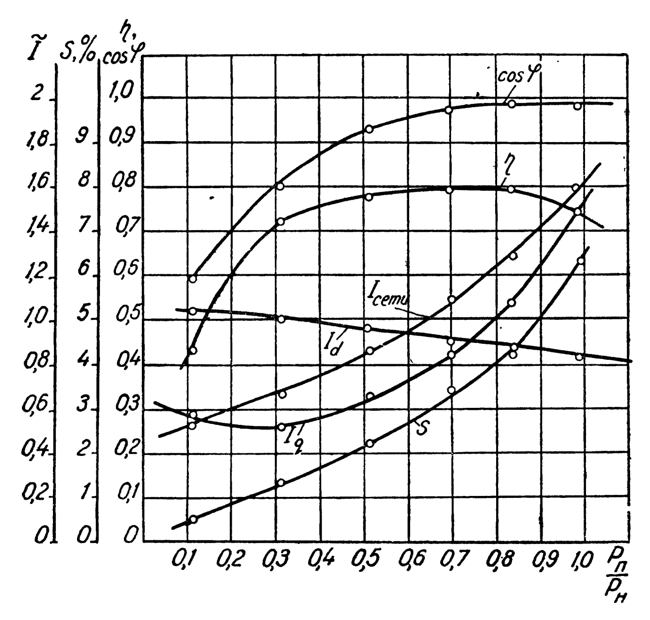


Рис. 27. Рабочие характеристики двигателя А 42-4 при параллельном включении обмоток

($\lambda_d = 1/3$, $\lambda_q = 2/3$, $C = 36{,}7$ *мкф*, $U_н = 380$ *в*, $I_н = 6{,}1$ *а*; $P_н = 2{,}8$ *квт*, $M_н = 1{,}92$ *кгм*, $n_c = 1500$ об/мин).

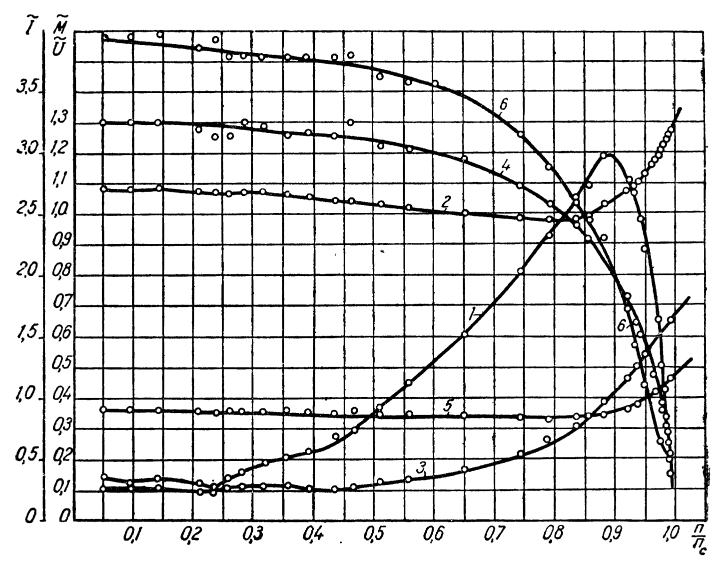


Рис. 28. Характеристики двигателя А 42-4 при параллельном включении обмоток

($\lambda_d = 1/3$, $\lambda_q = 2/3$, $C = 43{,}8$ *мкф*, $U_н = 380$ *в*, $P_н = 2{,}8$ *квт*, $M_н = 1{,}92$ *кгм*, $I_н = 6{,}1$ *а*, $n_c = 1500$ об/мин): *1* — $\overline{M}$; *2* — $\overline{U}_c$; *3* — $\overline{U}_d$; *4* — $\overline{I}_{сети}$; *5* — $\overline{I}_d$; *6* — $\overline{I}_q$.

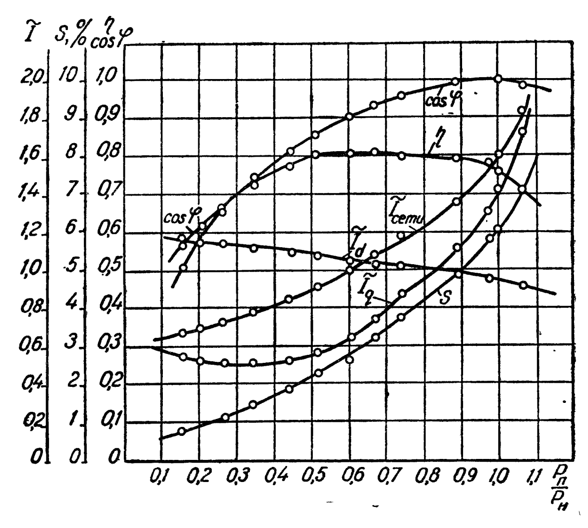


Рис. 29. Рабочие характеристики двигателя А 42-4 при параллельном включении обмоток

($\lambda_d = {}^1/_3$, $\lambda_q = {}^2/_3$, $C = 43{,}8$ *мкф*, $U_н = 380$ *в*, $P_н = 2{,}8$ *квт*, $I_н = 6{,}1$ *а*, $M_н = 1{,}92$ *кгм*, $n_c = 1500$ об/мин).

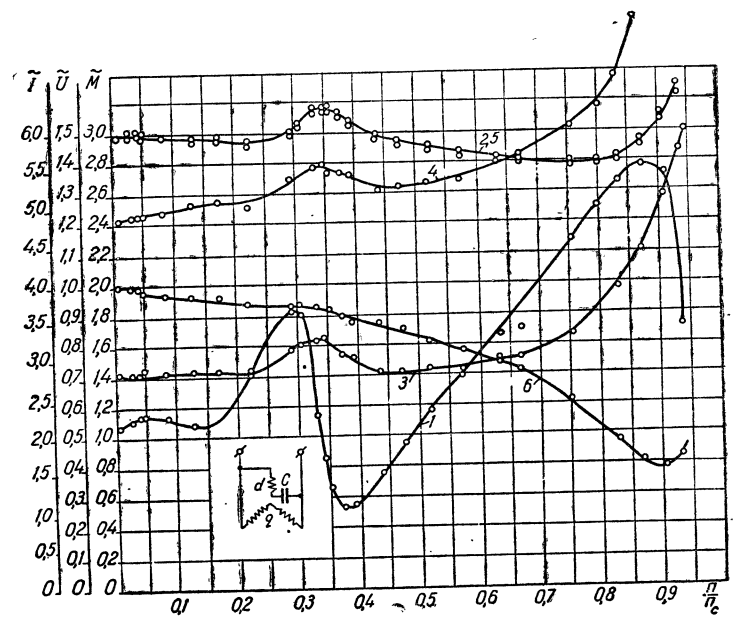


Рис. 30. Характеристики двигателя А 42-4 при параллельном включении обмоток

($\lambda_d = {}^1/_3$, $\lambda_q = {}^2/_2$, $C = 201$ *мкф*, $U_н = 380$ *в*, $P_н = 2{,}8$ *квт*, $I_н = 6{,}1$ *а*, $M_н = 1{,}92$ *кгм*, $n_c = 1500$ об/мин): *1*—$\bar{M}$; *2*—$\bar{U}_c$; *3*—$\bar{U}_d$; *4*—$\bar{I}_{сети}$; *5*—$\bar{I}_d$; *6*—$\bar{I}_q$.

Рис. 31. Характеристики двигателя А 41-4 при параллельном включении обмоток

($\lambda_q = ^1/_3$, $\lambda_d = ^2/_3$, $C = 27{,}7$ *мкф*; $U_н = 220$ *в*, $I_н = 3{,}8$ *а*, $P_н = 1{,}7$ *квт*, $M_н = 1{,}17$ *кгм*, $n_c = 1500$ об/мин): *1*—$\overline{M}$; 2—$\overline{U}_c$: 3—$\overline{U}_d$: 4—$\overline{I}_{сети}$: 5—$\overline{I}_d$: 6—$\overline{I}_q$.

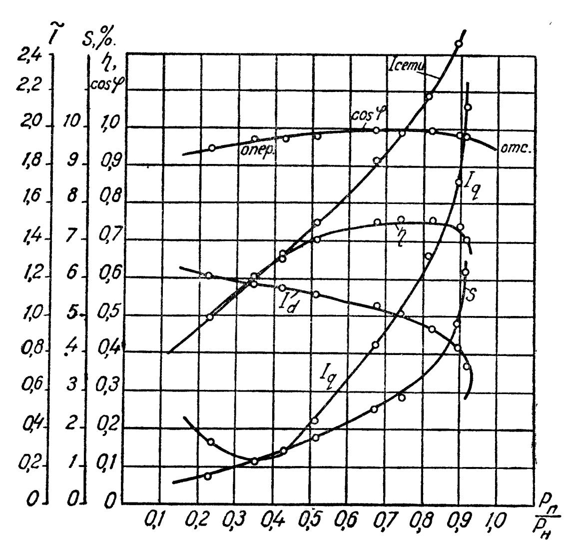


Рис. 32. Рабочие характеристики двигателя А 41-4 при параллельном включении обмоток

($\lambda_q = ^1/_3$, $\lambda_d = ^2/_3$, $C = 27{,}7$ *мкф*. $U_н = 220$ *в*, $I_н = 3{,}8$ *а*, $P_н = 1{,}7$ *квт*).

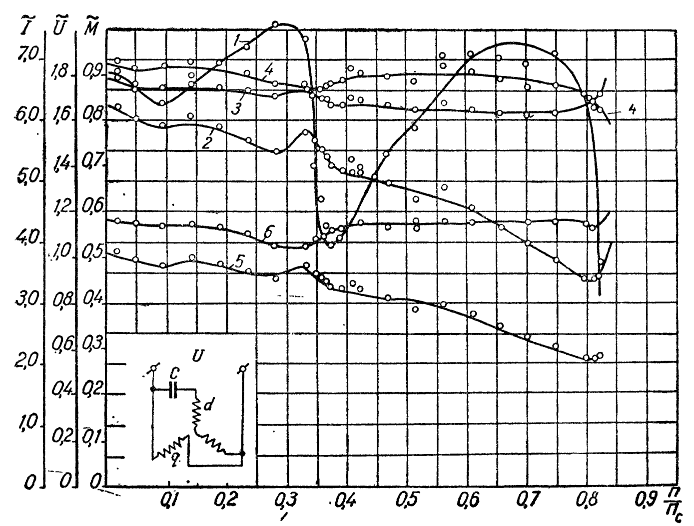


Рис. 33. Характеристики двигателя А 41-4 при параллельном включении обмоток

($\lambda_q = {}^1/_3$, $\lambda_d = {}^2/_3$, $C = 127$ *мкф*, $U_н = 220$ *в*, $I_н = 3{,}8$ *а*, $P_н = 1{,}7$ *квт*, $M_н = 1{,}17$ *кгм*, $n_с = 1500$ об/мин): *1*—$\overline{M}$; *2*—$\overline{U}_c$; *3*—$\overline{U}_d$; *4*—$\overline{I}_{сети}$, *5*—$\overline{I}_d$, *6*—$\overline{I}_q$.

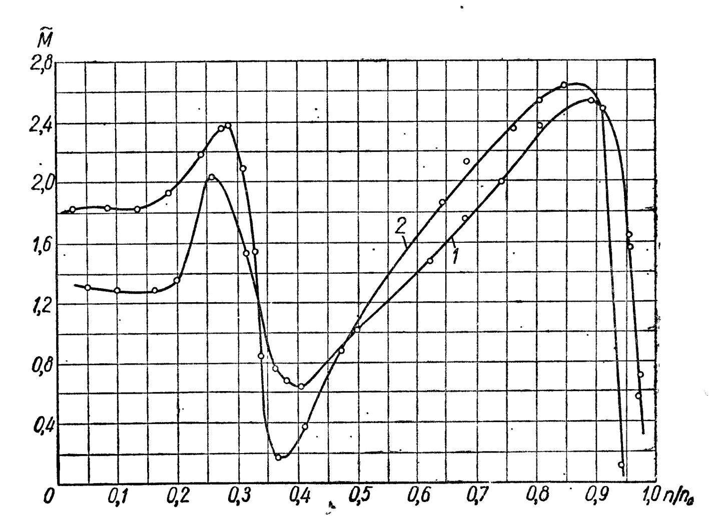


Рис. 34. Механические характеристики двигателя АОЛ 31-4М при параллельном включении обмоток

($\lambda_d = {}^1/_3$, $\lambda_q = {}^2/_3$, $U_н = 380$ *в*, $I_н = 1{,}6$ *а*, $M_н = 0{,}415$ *кгм*, $P_н = 0{,}6$ *квт*, $n_с = 1500$ об/мин): *1*—$C = 54{,}6$ *мкф*; *2*—$C = 89{,}2$ *мкф*.

разгону двигателя. При этом наибольшее влияние оказывает третья пространственная гармоника. При включении двигателя в качестве ОКД и $\lambda_d = {}^1/_3$, $\lambda_q = {}^2/_3$ основная фаза не создает третьей пространственной гармоники. Если емкость, включенная последовательно с обмоткой d, и ток I_d малы, то влияние третьей пространственной гармоники невелико. Невелик также и момент

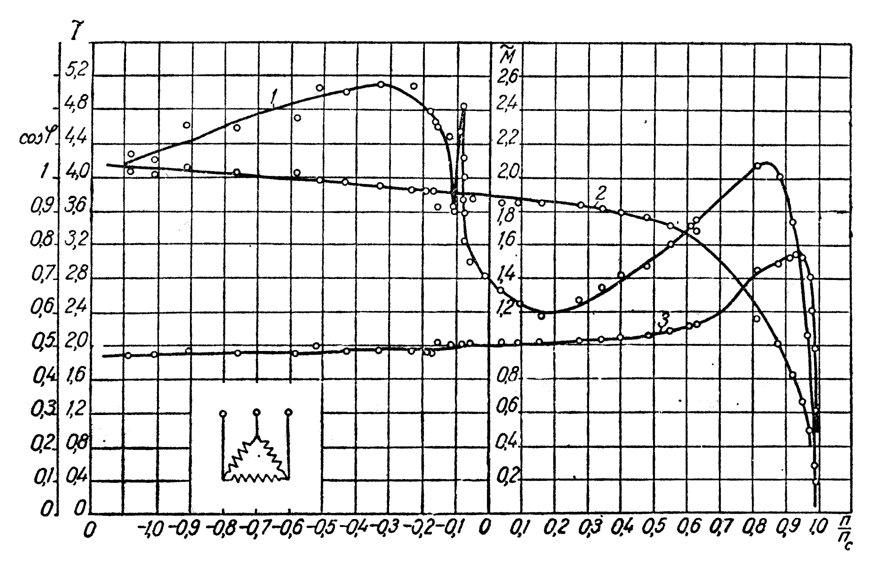


Рис. 35. Характеристики двигателя МА $142\text{-}{}^1/_8$ в режиме двигателя и противовключения

($U_{нф}$=220 *в*; $I_{нф}$=7,3 *а*, $P_н$=2,7 *квт*, $M_н$=3,66 *кгм*; $n_с$=750 *об/мин*): 1—$\tilde{M}$; 2—$\tilde{I}$; 3—$\cos\varphi$.

от основной гармоники. Минимальный момент особенно в случае двигателей с вытеснением тока в роторе, например МА $142\text{-}{}^1/_8$, равен нулю. При увеличении емкости примерно в четыре раза влияние третьей гармоники сказывается заметно. Пусковой момент $M_п = 0{,}8 M_н$. Однако минимальный момент $M_{\min} = 0{,}34\, M_н$.

Аналогичная картина имеет место для двигателей А 42-4, и А 41-4. Увеличение пусковой емкости с 54,6 до 82,9 *мкф* для двигателя АОЛ 31-4М (рис. 34) приводит к уменьшению минимального момента двигателя при пуске. При меньшей емкости (C=54,6 *мкф*) минимальный момент достигает больших значений — 0,64 $M_н$.

Номинальное напряжение двигателей МА $142\text{-}{}^1/_8$, А 42-4, А 41-6 и АОЛ 31-4М в режиме ОКД при $\lambda_q = {}^2/_3$ равно 370 *в*. Двигатель А 41-4 был испытан при $\lambda_q = {}^2/_3$ и $\lambda_d = {}^1/_3$. Номинальное напряжение однофазного двигателя при этом равно 220 *в* (т. е. фазному напряжению двигателя, см. рис. 31—33).

Основная фаза в этом случае создает третью пространственную гармонику. Величина тока основной обмотки значительно больше номинальной. Асинхронный момент от третьей гармоники значителен как при рабочей емкости, так и при пусковой. Последняя выбрана в пять раз больше рабочей. В двигателе ярко выражены резонансные явления. В результате этого максимальный момент от основной гармоники меньше момента двигателя при скорости $n=0,3\ n_c$.

Отсюда следует, что без специальных мер по устранению паразитных моментов трехфазные двигатели с номинальным напряжением 220/380 *в* в большинстве случаев нерационально применять в качестве однофазных для сетей 220 *в*.

Рабочая емкость в приведенных примерах подобрана опытным путем. При номинальном напряжении сети нагрузка двигателя и емкость подбираются такими, чтобы токи фаз были равны номинальному.

Для двигателя МА 142-1/8 рабочая емкость несколько больше 54 *мкф*, поскольку если $C=54$ *мкф*, то ток конденсаторной фазы меньше номинального (см. рис. 24). При равных токах фаз ОКД развивает мощность $P_2=2,02$ *квт*. Использование двигателя примерно равно 75%, заметим, что ротор двигателя МА 142-1/8 двуклеточный; пазы закрытые; заливка алюминием; номинальное скольжение равно 3,2%.

В приведенных примерах к. п. д. определяется отношением полезной мощности к потребляемой, а нагрев обмоток не контролировался. Поэтому значения к. п. д. ориентировочные. По каталогу для МА 142-1/8 имеем $\eta = 80,5\%$ и $s = 4\%$. Вращающий момент двигателя МА 142-1/8 в режиме противовключения больше минимального и максимального моментов в режиме двигателя (рис. 35). Вытеснение тока в роторе очень сильное, тем не менее при $P_2=0,75\ P_н$ для ОКД к. п. д. равен 78%.

Двигатель А 42-4 имеет глубокие пазы на роторе. Высота паза $h = 10,6$ *мм*, ширина паза по минимальному диаметру — 5,8 *мм*, по максимальному — 6,8 *мм*. Сопротивления ротора этого двигателя в процентном отношении значительно больше.

Однако в режиме ОКД при токах фаз, равных номинальному, к. п. д. несколько выше, чем в двигателе МА 142-1/8.

Увеличение активного сопротивления ротора приводит в конечном счете к понижению к. п. д. Для двигателя А 41-6 имеем $s_н=7\%$, к. п. д. однофазного двигателя составляет 70% при к. п. д. симметричного двигателя 77%.

Вопрос о рациональном распределении потерь в ОКД еще мало изучен. Для решения его необходимо более точное определение составляющих потерь и детальное аналитическое исследование.

Из приведенных опытных данных следует, что чем выше $\cos \varphi$ трехфазных двигателей, тем больше коэффициент использования мощности габарита однофазных. В среднем он равен 0,8.

ОКД имеют небольшую перегрузочную способность. Однако при пусковой емкости максимальный момент может быть получен значительно больше, чем при симметричной работе (табл. 14).

Для повышения перегрузочной способности ОКД необходимо автоматически увеличивать емкость конденсаторной фазы при повышении нагрузки. Необходимо также уменьшить емкость в случае понижения нагрузки.

При рабочей емкости и уменьшении нагрузки на валу двигателя ток конденсаторной фазы резко увеличивается. С точки зрения уменьшения перегрева двигателя на холостом ходу рабочая емкость должна быть выбрана возможно меньшей. При этом уменьшается коэффициент использования мощности габарита и перегрузочный момент. Это иллюстрируется данными двигателя А 42-4.

При $C_р = 36{,}7$ *мкф* на холостом ходу ток фазы d больше номинального примерно на 3%. Коэффициент мощности использования габарита равен 0,8. В рабочем режиме ток фазы d меньше номинального, $M_{max} = 1{,}14\ M_н$ (см. рис. 27, 28). При несколько большей рабочей емкости $C_р = 43{,}8$ *мкф* коэффициент использования мощности габарита равен 0,83, максимальный момент $M_{max} = 1{,}20\ M_н$. Однако ток конденсаторной фазы при холостом ходе оказывается примерно на 18% выше номинального. Для правильного выбора рабочей емкости требуется учет особенностей работы двигателя.

Напряжение конденсаторной батареи

Напряжение конденсаторной батареи зависит от скорости вращения ротора и величины емкости. Приведенные выше опытные данные показывают, что это напряжение при рабочей емкости и номинальных токах фаз составляет $(1{,}15 \div 1{,}22)\ U_{сети}$. При уменьшении нагрузки на валу двигателя напряжение конденсаторной батареи возрастает. На холостом ходу оно равно $U_с = (1{,}30 \div 1{,}35)\ U_{сети}$, а при пусковой емкости изменяется от $U_с = (1{,}5 \div 1{,}7) U_{сети}$ (при неподвижном роторе) до $U_с = (1{,}8 \div 2) U_{сети}$ (при холостом ходе).

При включении и выключении однофазного двигателя с параллельно включенными главной и вспомогательной обмотками напряжение конденсаторной батареи увеличивается. На рис. 36 приведены осциллограммы напряжения и тока конденсаторной батареи двигателя АОС 51/4. Рабочая емкость равна примерно 140 *мкф*.

Приведенные осциллограммы записаны при одних и тех же масштабах. Они получены при включении в сеть и отключении

Параметр	Тип двигателя						
	МА 142-1/8			А 42-4			
	Симметричная работа	$C=54$ *мкф*, $\lambda_d=1/3$, $\lambda_q=2/3$	$C=200,9$ *мкф*, $\lambda_d=1/3$, $\lambda_q=2/3$	Симметричная работа *	$C=36,7$ *мкф*, $\lambda_d=1/3$, $\lambda_q=2/3$	$C=43,8$ *мкф*, $\lambda_d=1/3$, $\lambda_q=2/3$	$C=201$ *мкф*, $\lambda_d=1/3$, $\lambda_q=2/3$
Напряжение сети, *в*	220/380	380	380	220/380	380	380	380
Номинальная мощность, *квт*	2,7	—	—	2,8	—	—	—
Номинальный ток, *а*	7,3	—	—	6,1	—	—	—
Коэффициент использования мощности габарита	—	0,75	—	—	0,8	0,83	—
Ток фазы *d*, I_d, *а*	—	0,99	—	—	0,9	1	—
Ток фазы *q*, I_q, *а*	—	1,01	—	—	1,0	1	—
К. п. д., %	83,8	78	—	83,5	80	79	—
$\cos\psi$	0,7	0,97	—	0,85	0,98	0,98	—
$M_{max}/M_н$	2,1	1,18	2,36	2,2	1,14	1,20	2,77
$M_п/M_н$	1,4	0,15	0,8	1,9	0,12	0,14	1,1
$M_{min}/M_н$	1,2	0	0,34	—	0,1	0,11	0,46
$I_п/I_н$	3,8	2,4	3,5	6,0	3,5	3,9	4,8
S, % } при P_2	3,2	2,85	—	5,33	4,4	4,4	—
$U_с/U_{сети}$, *в* } при P_2	—	1,15	—	—	1,13	1,15	—
$U_с/U_{сети}$, *в*, при $P_2=0$	—	1,35	2	—	1,29	1,3	2
Номинальное напряжение конденсаторов, *в*	—	500	500	—	500	500	500
Типовая мощность конденсаторной батареи, *квт*	—	4,24	15,74	—	2,78	3,44	15,8
$M_н$, *кгм*	3,66	3,66	3,66	1,92	1,92	1,92	1,92

двигателя от сети с напряжением 220 *в*. Обычно предполагают, что наибольшая величина напряжения на конденсаторной батарее имеет место при включении двигателя. В действительности максимальное напряжение возникает при выключении двигателя, причем однофазный двигатель самовозбуждается, работает как генератор и эффективно тормозится.

* По данным каталога

Таблица 14

и режим

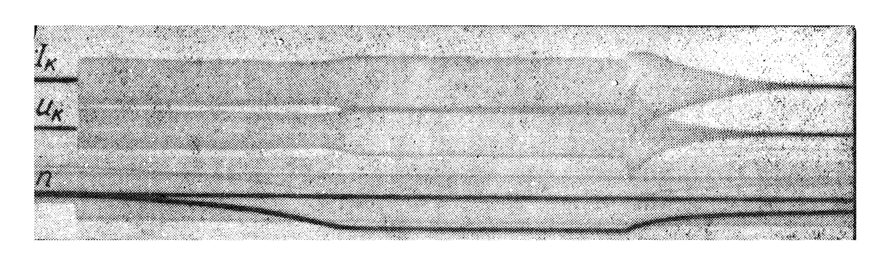
А 41-6			А 41-4			АОЛ 31-4М				
Симметричная работа	$C=19{,}15$ *мкф*, $\lambda_d=1/3$, $\lambda_q=2/3$	$C=111{,}2$ *мкф*, $\lambda_d=1/3$, $\lambda_q=2/3$	Симметричная работа*	$C=27{,}7$ *мкф*, $\lambda_d=1/3$, $\lambda_q=2/3$	$C=127{,}7$ *мкф*, $\lambda_d=1/3$, $\lambda_q=2/3$	Симметричная работа*	$C=12{,}5$ *мкф*, $\lambda_d=1/3$, $\lambda_q=2/3$	$C=20$ *мкф*, $\lambda_d=1/3$, $\lambda_q=2/3$	$C=54{,}6$ *мкф*, $\lambda_d=1/3$, $\lambda_q=2/3$	$C=89{,}2$ *мкф*, $\lambda_d=1/3$, $\lambda_q=2/3$
220/380	380	380	220/380	220	220	220/380	380	380	380	380
1,0	—	—	1,7	—	—	0,6	—	—	—	—
2,8	—	—	3,8	—	—	1,6	—	—	—	—
—	0,72	—	—	0,73	—	—	0,82	—	—	—
—	1	—	—	1,02	—	—	1,02	—	—	—
—	1	—	—	1,02	—	—	1	—	—	—
—	70	—	81,5	75	—	74	71	—	—	—
77	0,97	—	0,83	1,0	—	0,76	0,98	—	—	—
0,72	0,98	3,56	2,0	0,95	1,0	2,0	1,08	1,37	2,54	2,63
1,97	0,17	1,87	1,7	0,1	0,9	1,8	0,21	0,43	1,35	1,83
1,2	0,17	1,43	—	0,37	0,53	—	0,15	0,4	0,64	0,177
3,3	2,2	7,8	6,5	3,5	7,0	5,0	2,5	2,5	5,7	9,2
7	4,2	—	5,33	2,9	—	6	4,5	—	—	—
—	1,22	—	—	2,06	—	—	1,17	1,27	1,58	1,18
—	1,3	2	—	2,46	—	—	1,31	1,41	1,74	1,18
—	500	500	—	550	550	—	—	500	500	500
—	1,5	8,73	—	2,63	12,1	—	0,982	1,57	4,28	7,00
1,05	1,05	1,05	1,17	1,17	1,17	0,415	0,415	0,415	0,415	0,415

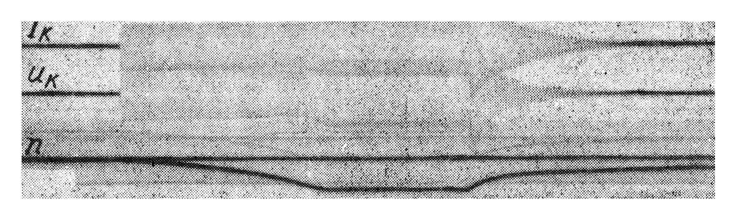
Отношение амплитуд напряжений конденсаторной батареи при выключении и при холостом ходе двигателя составляет

$$k_{н}=\frac{U_{ген}}{U_{х.х}}=2{,}14;\ 2\ и\ 1{,}78$$

соответственно при $C = 108$, 140 и 208 *мкф*.

Амплитуда напряжения конденсаторов при выключении





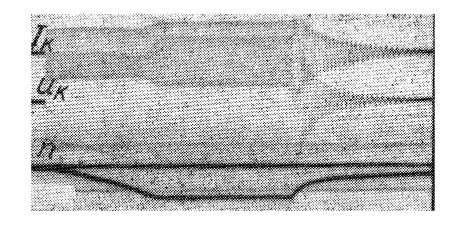


Рис. 36. Изменение напряжений и токов конденсаторной батареи однофазного двигателя АОС 51-4 с параллельно включенными обмотками $\lambda_d = {}^1/_3$, $\lambda_q = {}^2/_3$ при пуске и отключении двигателя; *а*—C=108 *мкф*; *б*=C=140 *мкф*; *в*—C=208*мкф*.

больше, чем при пуске, в 2—1,7 раза. Поэтому более важны перенапряжения конденсаторов, возникающие при выключении ОКД.

Время, в течение которого прикладывается это напряжение, невелико. Оно зависит от параметров привода и составляет примерно 0,3 сек. Эти перенапряжения являются существенным недостатком ОКД при параллельном включении обмоток и вынуждают выбирать конденсаторы с бо́льшим номинальным напряжением.

Если исходить из длительных напряжений рабочего режима, то номинальное напряжение конденсаторов для однофазных двигателей, включаемых в сеть 380 *в*, должно составлять $U_c = 1{,}3 \cdot 380 = 500$ *в*.

В табл. 14 приведена мощность конденсаторной батареи при номинальных напряжениях 500 и 550 *в*.

Глава IV

ОКД С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО-ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ВКЛЮЧЕНИЕМ ОБМОТОК

Схема включения трехфазного двигателя на однофазную сеть при параллельном включении главной и вспомогательной обмоток позволяет двигателю развивать мощность, равную 70—85% мощности двигателя в трехфазном режиме. Пусковые характеристики такого двигателя значительно ухудшаются вследствие резкого проявления паразитных моментов от третьих пространственных гармоник.

Последовательно-параллельное включение трехфазных обмоток статора однофазного двигателя и дополнительное шунтирование фазы *B* или *C* (рис. 37) позволяет получить значительно бóльшие пусковые моменты, устранить влияние третьих гармоник на кривую моментов, повысить мощность двигателя. Ценные свойства схем, показанных на рис. 37, мало известны, хотя заслуживают внимания. Интересен также и анализ их, так как это более общий случай ОКД.

Основные уравнения

Пусть схема включения и обозначения будет такая, как показано на рис. 37, *а*. Уравнения включения двигателя на основании законов Кирхгофа следующие:

$$\dot{U} = \dot{U}_A + \frac{\dot{I}_A}{y_A},$$

$$U = \dot{U}_C - \dot{U}_B\ ,$$

$$0 = \dot{I}_C + \dot{I}_{y_C} + \dot{I}_B = \dot{I}_C + I_B + \dot{U}_C y_c, \tag{187}$$

$$\dot{I} = \dot{I}_B - \dot{I}_A,$$

$$I_{y_c} = \dot{U}_C y_c\,.$$

Для определения токов и напряжений фаз двигателя воспользуемся методом симметричных составляющих, разложив напряжения и токи фаз на составляющие нулевой, прямой и обратной последовательностей по уравнениям (1).

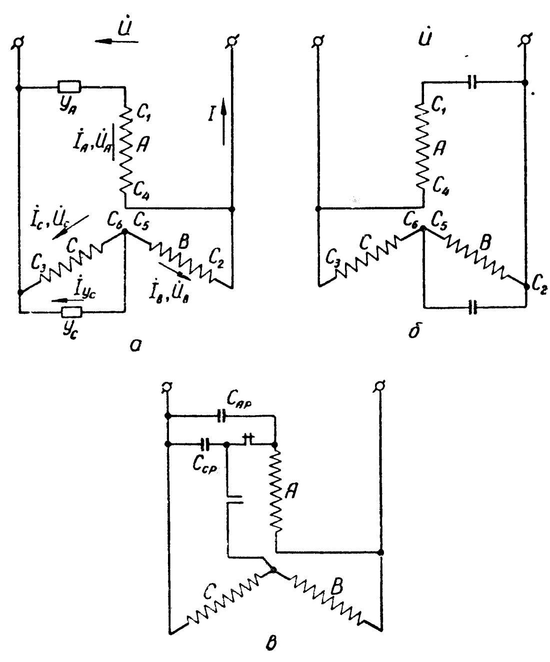


Рис. 37. Схемы включения однофазного двигателя при последовательно-параллельном включении обмоток.

Подставляя значения токов и напряжений фаз в (187), получим три основные уравнения двигателя

$$\dot U = \dot U_0\left(1+\frac{y_0}{y_A}\right)+\dot U_1\left(1+\frac{y_1}{y_A}\right)+U_2\left(1+\frac{y_2}{y_A}\right),$$

$$U = \dot U_1(a-a^2)+\dot U_2(a^2-a), \tag{188}$$

$$0 = \dot U_0(y_c+2y_0)+U_1(ay_c-y_1)+U_2(a^2y_c-y_2).$$

Решение этих уравнений относительно симметричных составляющих напряжений приводит к соотношениям

$$\dot U_0 = \frac{U}{\Delta}\left(2-\frac{y_c}{y_A}\right)(a^2y_1-ay_2), \tag{189}$$

$$U_1 = \frac{U}{\Delta}\left[a^2y_0\left(4+\frac{y_c}{y_A}\right)-y_2\left(1+\frac{y_c}{y_A}\right)-\frac{3y_0y_2}{y_A}+3a^2y_c\right], \tag{190}$$

$$\dot{U}_2 = \frac{U}{\Delta}\left[-ay_0\left(4+\frac{y_c}{y_A}\right)+y_1\left(1+\frac{y_c}{y_A}\right)+\frac{3y_0y_1}{y_A}-3ay_c\right]. \quad (191)$$

Главный определитель уравнений (188)

$$\Delta = (a^2-a)\left(3y_c+4y_0+y_1+\frac{y_1y_c}{y_A}+y_2+\frac{y_2y_c}{y_A}+\frac{y_0y_c}{y_A}+\right.$$
$$\left.+\frac{3y_0y_1}{y_A}+\frac{3y_0y_2}{y_A}\right). \quad (192)$$

Принимая, что линейное напряжение однофазной сети равно номинальному, и учитывая, что

$$U = \sqrt{3}\,U_{н.ф},$$

находим комплексы относительных значений напряжений нулевой, прямой и обратной последовательностей

$$\bar{U}_0 = \frac{\dot{U}_0}{U_{н.ф}} = j\frac{(2y_A-y_c)(a^2y_1-ay_2)}{3y_0(y_1+y_2)+(3y_c+4y_0+y_1+y_2)y_A+(y_1+y_2+y_0)y_c}, \quad (193)$$

$$\bar{U}_1 = \frac{\dot{U}_1}{U_{н.ф}} = j\frac{a^2y_0(4y_A+y_c)-y_2(y_A+y_c)-3y_0y_2+3a^2y_cy_A}{3y_0(y_1+y_2)+(3y_c+4y_0+y_1+y_2)y_A+(y_1+y_2+y_0)y_c}, \quad (194)$$

$$\bar{U}_2 = \frac{\dot{U}_2}{U_{н.ф}} = j\frac{-ay_0(4y_A+y_c)+y_1(y_A+y_c)+3y_0y_1-3ay_cy_A}{3y_0(y_1+y_2)+(3y_c+4y_0+y_1+y_2)y_A+(y_1+y_2+y_0)y_c}. \quad (195)$$

Пусковой режим

В пусковом режиме проводимости прямой и обратной последовательностей равны

$$y_1 = y_2 = y_k.$$

Относительные значения напряжений прямой и обратной последовательностей записываются несколько проще:

$$\bar{U}_1 = j\frac{a^2y_0(4y_A+y_c)-y_k(y_A+y_c)-3y_0y_k+3a^2y_cy_A}{6y_0y_k+(3y_c+4y_0+2y_k)y_A+(2y_k+y_0)y_c}, \quad (194а)$$

$$\bar{U}_2 = j\frac{-ay_0(4y_A+y_c)+y_k(y_A+y_c)+3y_0y_k-3ay_cy_A}{6y_0y_k+(3y_c+4y_0+2y_k)y_A+(2y_k+y_0)y_c}. \quad (195а)$$

Вводя отношение модулей проводимостей

$$\bar{y}_0 = \left|\frac{y_0}{y_k}\right|; \quad \bar{y}_A = \left|\frac{y_A}{y_k}\right|; \quad \bar{y}_c = \left|\frac{y_c}{y_k}\right|$$

и принимая для общности, что проводимости активно-индуктивные

$$y_0 = |y_0| e^{-j\varphi_0}, \quad y_A = |y_A| e^{-j\varphi_A}, \quad y_c = |y_c| e^{-j\varphi_c},$$

находим после ряда преобразований комплексы напряжений

$$\bar{U}_1 = \frac{c - d - j(a + b)}{n - jm}, \qquad (196)$$

$$\bar{U}_2 = \frac{c + d + j(a - b)}{n - jm}. \qquad (197)$$

В соотношениях (196) и (197) приняты обозначения

$$a = 2\bar{y}_0\bar{y}_A \cos(\varphi_0 + \varphi_A) + \frac{1}{2}\bar{y}_0\bar{y}_c \cos(\varphi_0 + \varphi_c) + \bar{y}_A \cos(\varphi_k + \varphi_A) +$$
$$+ y_c \cos(\varphi_k + \varphi_c) + 3\bar{y}_0 \cos(\varphi_0 + \varphi_k) + \frac{3}{2}\bar{y}_c\bar{y}_A \cos(\varphi_A + \varphi_c), \qquad (198)$$

$$b = 2\sqrt{3}\,\bar{y}_0\bar{y}_A \sin(\varphi_0 + \varphi_A) + \frac{\sqrt{3}}{2}\bar{y}_0\bar{y}_c \sin(\varphi_0 + \varphi_c) +$$
$$+ \frac{3\sqrt{3}}{2}\bar{y}_c\bar{y}_A \sin(\varphi_A + \varphi_c), \qquad (199)$$

$$c = 2\sqrt{3}\,\bar{y}_0\bar{y}_A \cos(\varphi_0 + \varphi_A) + \frac{\sqrt{3}}{2}\bar{y}_0\bar{y}_c \cos(\varphi_0 + \varphi_c) +$$
$$+ \frac{3\sqrt{3}}{2}\bar{y}_c\bar{y}_A \cos(\varphi_A + \varphi_c), \qquad (200)$$

$$d = 2\bar{y}_0\bar{y}_A \sin(\varphi_0 + \varphi_A) + \frac{1}{2}\bar{y}_0\bar{y}_c \sin(\varphi_0 + \varphi_c) + \bar{y}_A \sin(\varphi_k + \varphi_A) +$$
$$+ \bar{y}_c \sin(\varphi_k + \varphi_c) + 3\bar{y}_0 \sin(\varphi_0 + \varphi_k) + \frac{3}{2}\bar{y}_c\bar{y}_A \sin(\varphi_A + \varphi_c), \qquad (201)$$

$$n = 6\bar{y}_0 \cos(\varphi_0 + \varphi_k) + 3\bar{y}_c\bar{y}_A \cos(\varphi_c + \varphi_A) + 4\bar{y}_0\bar{y}_A \cos(\varphi_0 + \varphi_A) +$$
$$+ 2\bar{y}_A \cos(\varphi_k + \varphi_A) + 2\bar{y}_c \cos(\varphi_k + \varphi_c) + \bar{y}_0\bar{y}_c \cos(\varphi_0 + \varphi_c), \qquad (202)$$

$$m = 6\bar{y}_0 \sin(\varphi_0 + \varphi_k) + 3\bar{y}_c\bar{y}_A \sin(\varphi_c + \varphi_A) + 4\bar{y}_0\bar{y}_A \sin(\varphi_0 + \varphi_A) +$$
$$+ 2\bar{y}_A \sin(\varphi_k + \varphi_A) + 2\bar{y}_c \sin(\varphi_k + \varphi_c) + \bar{y}_0\bar{y}_c \sin(\varphi_0 + \varphi_c) \qquad (203)$$

Отношение пускового момента двигателя в однофазном режиме к пусковому моменту двигателя в трехфазном режиме определяется как разность квадратов модулей относительных значений напряже-

ний прямой и обратной последовательностей по (87). После подстановки значений и преобразований находим

$$\mu_{п}=\frac{4\,(ab-cd)}{m^2+n^2}\,. \tag{204}$$

При вычислении значения пускового момента более удобно пользоваться соотношением

$$\mu_{п}=\frac{2\sqrt{3}}{m^2+n^2}\cdot\{\bar{y}_0\bar{y}_A\bar{y}_c\,[\sin(\varphi_0+\varphi_c-\varphi_k-\varphi_A)+4\sin(\varphi_0+\varphi_A-$$

$$-\varphi_k-\varphi_c)+9\sin(\varphi_A+\varphi_c-\varphi_0-\varphi_k)]+$$

$$+4\bar{y}_0\bar{y}_A^2\sin(\varphi_0-\varphi_k)+\bar{y}_0\bar{y}_c^2\sin(\varphi_0-\varphi_k)+3\bar{y}_A^2\bar{y}_c\sin(\varphi_c-\varphi_k)+$$

$$+3\bar{y}_A\bar{y}_c^2\sin(\varphi_A-\varphi_k)+12\bar{y}_0^2\bar{y}_A\sin(\varphi_A-\varphi_k)+3\bar{y}_0\bar{y}_c\sin(\varphi_c-\varphi_k)\}. \tag{205}$$

По уравнению (205) можно определить пусковой момент двигателя при любом типе фазосдвигающих сопротивлений.

Чтобы устранить вредное влияние паразитных моментов от третьей пространственной гармоники м. д. с. токи нулевой последовательности двигателя при пуске должны быть минимальными.

Уравнение (193) показывает, что токи нулевой последовательности равны нулю при соотношении проводимостей

$$2y_A=y_c. \tag{206}$$

Из (206) вытекают соотношения для модулей и фаз фазосдвигающих проводимостей

$$\bar{y}_c=2\bar{y}_A,\quad \varphi_c=\varphi_A\,. \tag{206а}$$

С учетом (206а) относительное значение пускового момента записывается проще:

$$\mu_{п}=\sqrt{3}\,\frac{[2\bar{y}_0\bar{y}_A^2\cos(\varphi_A-\varphi_0)+\bar{y}_A^3+\bar{y}_0^2\bar{y}_A]\sin(\varphi_A-\varphi_k)}{\bar{y}_0^2+\bar{y}_A^2+\bar{y}_A^4+\bar{y}_0^2\bar{y}_A^2+2\bar{y}_0\bar{y}_A^2\cos(\varphi_0+\varphi_k-2\varphi_A)+}.$$

$$+2\bar{y}_0^2\bar{y}_A\cos(\varphi_k-\varphi_A)+2\bar{y}_0\bar{y}_A^3\cos(\varphi_A-\varphi_0)+2\bar{y}_0\bar{y}_A\cos(\varphi_0-\varphi_A)+$$

$$+2\bar{y}_A^3\cos(\varphi_A-\varphi_k)+2\bar{y}_0\bar{y}_A\cos(\varphi_0-\varphi_k) \tag{207}$$

При конденсаторном пуске можно принять $\varphi_A=\varphi_c=-90°$. Тогда

$$\mu_{п}=\sqrt{3}\,\frac{[2\bar{y}_0\bar{y}_A^2\sin\varphi_0-\bar{y}_A^3-\bar{y}_0^2\bar{y}_A]\cos\varphi_k}{\bar{y}_0^2+\bar{y}_A^2+\bar{y}_A^4+\bar{y}_0^2\bar{y}_A^2-2\bar{y}_0^2\bar{y}_A\sin\varphi_k-2\bar{y}_0\bar{y}_A^3\sin\varphi_0-}.$$

$$-2\bar{y}_0\bar{y}_A\sin\varphi_0-2\bar{y}_A^3+4\bar{y}_0\bar{y}_A^2\sin\varphi_0\sin\varphi_k \tag{208}$$

Расчеты по формуле (208) показывают, что при использовании в схеме рис. 37 конденсаторов без потерь знак пускового момента двигателя отрицательный. Это означает, что двигатель с конденсаторным пуском при схеме включения по рис. 64 вращается в сторону поля, создаваемого напряжениями обратной последовательности.

При включении двигателя по схеме рис. 37, *б* поле напряжения прямой последовательности больше поля напряжения обратной последовательности, и пусковой момент, определяемый по соотношению (87), будет положительным. Следовательно, для реверсирования двигателя необходимо переключить его по рис. 37, *а, б,* т. е. поменять местами концы C_2 и C_3. При $y_c = 2y_A$ и использовании для целей пуска конденсаторов величина пускового момента двигателя в однофазном режиме может быть в три раза больше, чем в трехфазном режиме. Максимальное значение пускового момента достигается при $\bar{y}_A = 1$ и $\bar{y}_c = 2$. При $\bar{y}_A \approx 0,5$ и $\bar{y}_c = 1$ пусковой момент $\mu_п = 1$.

Уравнение (206) может быть удовлетворено при любом типе проводимостей y_A и y_c, в том числе и при активных ($\varphi_A = \varphi_c = 0$). Это дает возможность устранить вредное влияние третьей пространственной гармоники в однофазных двигателях с активными пусковыми сопротивлениями в цепи вспомогательной фазы.

Для устранения паразитных моментов от третьей гармоники шаг обмотки статора значительно сокращается. Если главную обмотку однофазного двигателя разбить на две фазы и шунтировать одну из них на время пуска активным сопротивлением, величина которого удовлетворяет соотношению (206), то провалов, обусловленных третьими пространственными гармониками не будет, и обмотка статора может быть диаметральной. При $\bar{y}_c = 2\bar{y}_A$ и $\varphi_A = \varphi_c = 0$ уравнение пускового момента имеет вид:

$$\mu_п = -\sqrt{3}\,\frac{[2\bar{y}_0\bar{y}_A^2\cos\varphi_0 + \bar{y}_A^3 + \bar{y}_0^2\,y_A]\sin\varphi_k}{\bar{y}_0^2 + \bar{y}_A^2 + \bar{y}_A^4 + \bar{y}_0^2\bar{y}_A^2 + 4\bar{y}_0\bar{y}_A^2\cos\varphi_0\cos\varphi_k + } \to$$

$$+ (2\bar{y}_0^2\cos\varphi_k + 2\bar{y}_0\cos\varphi_0)\bar{y}_A + (2\bar{y}_0\cos\varphi_0 + 2\cos\varphi_k)\bar{y}_A^3 \qquad (209)$$

Расчеты пусковых моментов при $\bar{y}_0 = 1,18$, $\cos\varphi_0 = 0,43$ и $\cos\varphi_к = 0,53$, показывают (рис. 38, кривая *2*), что при использовании двух активных проводимостей y_A и y_c пусковой момент составляет примерно половину пускового момента в трехфазном режиме.

Соотношение (205) позволяет рассчитать величину пускового момента при параллельном включении обмоток, т. е. при $y_c = 0$.

При $\bar{y}_A \neq 0$, $\varphi_A \neq 0$ и $\bar{y}_c = 0$ пусковой момент определяется соотношением

$$\mu_п = 2\sqrt{3}\,\frac{\bar{y}_0\bar{y}_A^2 \sin(\varphi_0 - \varphi_k) + 3\bar{y}_0^2\bar{y}_A \sin(\varphi_A - \varphi_k)}{9\bar{y}_0^2 + \bar{y}_A^2[1 + 4\bar{y}_0\cos(\varphi_0 - \varphi_k) + 4\bar{y}_0^2] + \bar{y}_A[12\bar{y}_0^2\cos(\varphi_A - \varphi_k) + 6\bar{y}_0\cos(\varphi_A - \varphi_0)]} \qquad (210)$$

На рис. 38 приведены результаты расчетов пусковых моментов двигателя при использовании одного сопротивления или одной

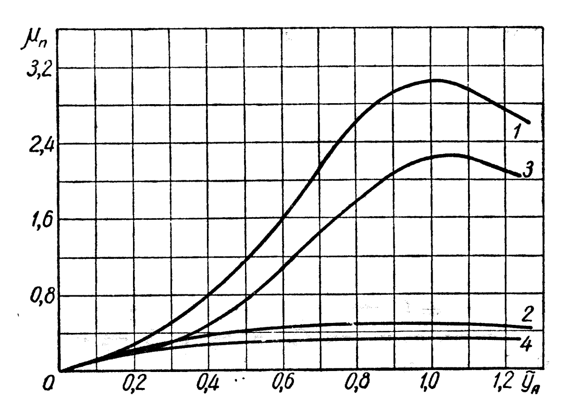


Рис. 38. Зависимость пускового момента однофазного двигателя с параллельно-последовательным включением обмоток от проводимости y_A

$\bar{y}_0=1,18$, $\cos\varphi_K=0,53$, $\cos\varphi_0=0,43$; *1* — $\bar{y}_c=2\bar{y}_A$, $\varphi_c=\varphi_A=-90°$ (емкость); *2* — $\bar{y}_c=2\bar{y}_A$; $\varphi_c=\varphi_A=0$; *3* — $\bar{y}_c=0$; $\varphi_A=-90°$ (емкость); *4* — $\bar{y}_c=0$, $\varphi_a=0$.

емкости. Зависимость пускового момента от проводимости $\bar{y}_A$ при использовании конденсаторов представлена кривой *3*, при пуске с активным сопротивлением — кривой *4*.

Сравнение кривых показывает преимущества однофазного двигателя с двумя проводимостями. При пуске с помощью двух активных сопротивлений могут быть получены пусковые моменты на 30—40% больше, чем при пуске с помощью одного активного сопротивления.

Аналогичные соотношения получаются при использовании двух конденсаторных батарей. Пусковой момент может быть получен в три раза больше, чем в трехфазном режиме и в 1,3—1,4 раза больше, чем в однофазном режиме с одной пусковой емкостью.

Необходимо учитывать, что при последовательно-параллельном включении обмоток паразитные моменты от третьей гармоники могут быть полностью устранены, и кривые *1* и *2* показывают одновременно и минимальные вращающие моменты.

В используемых обычно однофазных двигателях с отключаемой пусковой обмоткой, имеющей повышенное активное сопротивление, величина пускового момента больше, чем получается из формулы (210). Это достигается путем некоторого уменьшения числа витков и увеличения тока пусковой обмотки.

Для анализа однофазного двигателя с уменьшенным числом витков пусковой обмотки полученные нами уравнения непригодны. Из изложенного ясно, что шунтирование фазы C значительно улучшает пусковые характеристики. Особенно благоприятны характеристики при использовании для пуска конденсаторов. В схеме рис. 37 рабочая емкость, шунтирующая фазу C, переключается на время пуска в цепь фазы A. Пусковая емкость при этом в три раза больше рабочей емкости фазы A. В долях от проводимости короткого замыкания $y_к$ проводимость пусковых конденсаторов C_A составляет

$$\bar{y}_A = \frac{3}{2}\cdot\frac{y_s}{k_i y_s} = \frac{1,5}{k_i} = 0,3 \rightarrow 0,5,$$

если кратность пускового тока $k_i = 3—5$.

При $\bar{y}_A = 0,3$, $\bar{y}_c = 0$ пусковой момент двигателя $\mu_п = 0,32$. Если не переключить емкость C_c в фазу A, то пусковой момент равен $\mu_п = 0,12$ (см. рис. 38). Таким образом, переключение рабочей емкости C_c в фазу A по схеме рис. 37, *в*, дает увеличение пускового момента в 2—2,5 раза по сравнению с значением без такого переключения. Конденсаторы C_c при этом подвергаются перенапряжениям, продолжительность и амплитуда которых невелика и находится в допустимых пределах.

При вращении ротора двигателя со скоростью $n/n_c = 0—0,4$ (n_c — синхронная скорость) проводимости прямой и обратной последовательностей мало отличаются друг от друга. Можно принять, что при таких скоростях проводимости прямой и обратной последовательностей равны проводимости короткого замыкания

$$y_1 \approx y_2 \approx y_k = |y_k|\, e^{-j\varphi_k}. \tag{211}$$

Квадрат модуля относительного значения напряжения нулевой последовательности при условии (211) может быть записан в такой форме:

$$|\bar{U}_0|^2 = 3\,\frac{2\bar{y}_A^2 - 2\bar{y}_A\bar{y}_c\cos(\varphi_A - \varphi_c) + \bar{y}_c^2}{m^2 + n^2}. \tag{212}$$

Момент от токов нулевой последовательности пропорционален квадрату напряжения. Если известна величина максимального тормозного момента двигателя $M_{онт}$ от токов нулевой последовательности при напряжении нулевой последовательности, равном номинальному фазному напряжению (см. напр. рис. 9), то

действительная величина тормозного момента от токов нулевой последовательности определится соотношением

$$M_{\text{то}} = M_{\text{онт}} |\bar{U}_0|^2. \tag{213}$$

Тормозной момент достигает максимального значения при скорости $n/n_{\text{с}} \approx 0{,}4$. Момент вращения двигателя при такой скорости определяется как разность момента от токов прямой последовательности и моментов от токов обратной и нулевой последовательности

$$M_B = M_1 - M_2 - M_{\text{то}}. \tag{214}$$

При $n/n_{\text{c}} \approx 0{,}4$ можно принять, что разность моментов от токов прямой и обратной последовательности равна пусковому моменту двигателя в однофазном режиме

$$M_1 - M_2 = M_{\text{п}}, \tag{215}$$

тогда момент вращения двигателя при скорости $n/n_{\text{c}} = 0{,}4$ запишется в таком виде:

$$M_B = M_{\text{п}} - M_{\text{то}}. \tag{216}$$

Разделив уравнение (216) на пусковой момент двигателя в трехфазном режиме $M_{\text{п.т}}$, находим:

$$\mu_B = \mu_{\text{п}} - \frac{M_{\text{то}}}{M_{\text{п.т}}} = \mu_{\text{п}} - \mu_{\text{от}} |\bar{U}_0|^2, \tag{217}$$

где $\mu_{\text{от}}$ — отношение максимального тормозного момента от токов нулевой последовательности при напряжении нулевой последовательности, равном номинальному фазному, к пусковому моменту двигателя в трехфазном режиме.

Величина $\mu_{\text{от}}$ зависит от параметров обмоток статора и ротора и изменяется в широких пределах. Чем больше отношение максимального момента двигателя к пусковому в трехфазном режиме, тем больше значение $\mu_{\text{от}}$.

Для двигателей малой мощности, выполненных с диаметральной обмоткой статора и вытеснением тока в роторе $\mu_{\text{от}} = 2$—3. Для двигателя A 42 - 6 $\mu_{\text{от}} = 2{,}35$; для A 41 - 6 $\mu_{\text{от}} = 2{,}88$; для А 41 - 4 $\mu_{\text{от}} = \frac{4{,}66}{1{,}46} = 3{,}19$ (см. рис. 9).

Момент от токов нулевой последовательности тормозной независимо от направления вращения ротора, поэтому в уравнении (217) необходимо брать абсолютное значение пускового момента. Подставляя в (217) значение $\mu_{\text{п}}$ и $|\bar{U}_0|^2$ и пренебрегая изменением проводимости y_0, получим

$$\mu_B = \frac{|4(ab - cd)| - 3\mu_{\text{от}}[2\bar{y}_A^2 - 2\bar{y}_A \bar{y}_c \cos(\varphi_A - \varphi_c) + \bar{y}_c^2]}{m^2 + n^2}. \tag{218}$$

Соотношение (218) дает значение минимального вращающего момента двигателя при параллельно-последовательном включении обмоток и может служить критерием для выбора проводимостей y_A и y_c однофазного двигателя.

При использовании двух проводимостей y_A и y_c токи нулевой последовательности могут быть равными нулю. При этом проводимости y_A и y_c должны удовлетворять (206).

Уравнение (218) можно использовать также для расчетов вращающих моментов и выбора проводимости y_A для двига-

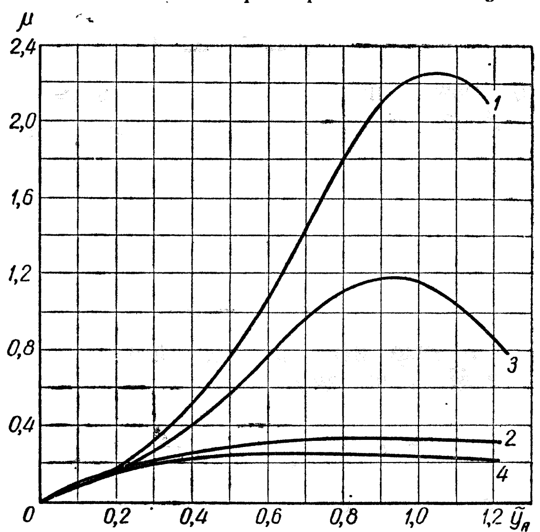


Рис. 39. Пусковые (кривые 1, 2) и минимальные (кривые 3, 4) вращающие моменты в зависимости от проводимости $\bar{y}_A$ однофазного двигателя А 42-6 с параллельно включенными обмотками:

1 и 3 — при $\varphi_A = -90°$; 2, 4 — при $\varphi_A = 0$; $P_н = 1{,}7$ *квт*; $I_н = 4{,}3$ *а*; $M_н = 1{,}78$ *кгм*; $\frac{M_п}{M_н} = 1{,}37$; $\mu_{он} = 2{,}35$; $\bar{y}_0 = 1{,}18$; $\cos\varphi_0 = 0{,}43$; $\cos\varphi_к = 0{,}53$,

теля с параллельно включенными обмотками. При $y_c = 0$, $y_A \neq 0$, $\varphi_A \neq 0$.

$$\mu_B = 2\sqrt{3}\,\frac{\left|\bar{y}_0\bar{y}_A^2 \sin(\varphi_0 - \varphi_k) + 3\bar{y}_0^2\bar{y}_A \sin(\varphi_A - \varphi_k)\right| - \frac{\sqrt{3}}{4}\,\mu_{от}\bar{y}_A^2}{9\bar{y}_0^2 + \bar{y}_A\left[12\bar{y}_0^2 \cos(\varphi_A - \varphi_k) + 6\bar{y}_0 \cos(\varphi_A - \varphi_0)\right] + \bar{y}_A^2\left[4\bar{y}_0^2 + 4\bar{y}_0 \cos(\varphi_0 - \varphi_k) + 1\right]}. \qquad (219)$$

На рис. 39 показаны полученные по формуле (219) кривые минимальных вращающих моментов двигателя при конденса-

торном (кривая *3*) и при реостатном пуске (кривая *4*). Величина пускового момента двигателя представлена кривыми *1* и *2* соответственно для конденсаторного и реостатного пуска. Тормозной момент, обусловленный третьей пространственной гармоникой, пропорционален квадрату проводимости $\bar{y}_A^2$ и при проводимостях больше единицы резко возрастает.

В связи с этим максимум вращающего момента сдвинут по отношению к максимуму пускового момента в сторону меньших проводимостей.

Кривые на рис. 39 показывают, что чем выше пусковой момент двигателя, тем меньше отношение минимального вращающего момента к пусковому. При конденсаторном пуске, если $\mu_п = 1$, то $\mu_B = 0{,}7$, если же $\mu_п = 2$, то $\mu_B = 1{,}16$ и $\frac{\mu_B}{\mu_п} = 0{,}58$.

В связи с этим выбор емкости имеет большое значение. При увеличении емкости до $\bar{y}_A = 1$ пусковой момент возрастает. Более интенсивно растет тормозной момент. Минимальный момент увеличивается медленно.

Из приведенных выше расчетов следует, что проводимость y_A, используемая для пуска двигателя при параллельном включении обмоток, должна быть при конденсаторном и при реостатном пуске.

$$\bar{y}_A = 0{,}65 - 0{,}75. \tag{220}$$

Рабочий режим

Как уже было установлено, при использовании для пуска двигателя, включаемого по схеме рис. 37, активных сопротивлений или конденсаторов ротор двигателя вращается в направлении поля обратной последовательности. Поэтому при вращении ротора проводимость обратной последовательности будет определяться скольжением s, проводимость прямой последовательности — скольжением $2—s$. В целях устранения возможных ошибок в дальнейшем принимается $y_2 = y_s$ и $y_1 = y_{2-s}$

В рабочем режиме поле, вращающееся в направлении, обратном направлению вращения ротора, должно быть минимальным, в лучшем случае равным нулю.

Соотношение параметров такого режима найдем из условия равенства нулю напряжения прямой последовательности.

При $U_1 = 0$

$$a^2 y_0 (4y_A + y_c) - y_s (y_A + y_c) - 3y_0 y_s - 3a^2 y_c y_A = 0. \tag{221}$$

В уравновешенном режиме работы однофазного двигателя должно быть равно нулю также и напряжение нулевой последовательности. Для этого параметры y_A и y_c должны удовлетворять уравнению $y_c = 2y_A$.

Подставляя в (221) это значение y_c, находим

$$2a^2y_A^2 + (2a^2y_0 - y_s)\,y_A - y_0y_s = 0. \tag{222a}$$

Из (221a) находим

$$y_A = \frac{1}{2}\,ay_s \text{ и } y_c = ay_s. \tag{222}$$

При этих значениях y_A и y_c модуль $\overline{U}_2$ равен единице,

$$\overline{U}_2 = j\,\frac{-ay_0(2ay_s + ay_s) + y_{2-s}\left(\frac{1}{2}\,ay_s + ay_s\right) + 3y_0y_{2-s} - \frac{3}{2}\,a^2y_s^2}{3y_0(y_s + y_{2-s}) + (3ay_s + 4y_0 + y_s + y_{2-s})\frac{1}{2}ay_s + (y_s + y_{2-s} + y_0)\,ay_s} = j.$$

В уравновешенном режиме

$$\overline{U}_0 = \dot{I}_0 = \dot{U}_1 = \dot{I}_1 = 0, \text{ а } \overline{U}_2 = j,$$

поэтому

$$\dot{I}_A = jU_{\text{н.ф}}\,y_s = j\dot{I}_s,\ \dot{I}_B = ja\dot{I}_s,\quad \dot{I}_c = ja^2\dot{I}_s,$$

$$\dot{U}_A = jU_{\text{н.ф}},\quad \dot{U}_B = jaU_{\text{н.ф}},\ \dot{U}_c = ja^2U_{\text{н.ф}}. \tag{223}$$

Ток сети при уравновешенном режиме

$$\dot{I} = \dot{I}_s(ja - j) = ja^2\dot{I}_s(-j\sqrt{3}) = -\sqrt{3}\dot{I}_s e^{j60^\circ} \tag{224}$$

опережает ток $\dot{I}_s$ на 60°.

При использовании емкостей без потерь уравновешенный режим возможен при угле сдвига фаз, определяемом из соотношения

$$e^{j90^\circ} = e^{j(120^\circ - \varphi)},$$

т. е. при $\varphi = 30^\circ$.

Отсюда следует, что в уравновешенном режиме при последовательно-параллельном включении обмоток могут работать двигатели с коэффициентом мощности $\cos\varphi = 0{,}866$. Коэффициент мощности однофазного двигателя в уравновешенном режиме будет опережающим и также равным 0,866. Рассмотрим мощность конденсаторных батарей в уравновешенном режиме. Напряжение конденсаторной батареи, включенной в фазу A,

$$U_{\text{к}A} = \frac{\dot{I}_A}{y_A} = \frac{jU_{\text{н.ф}}y_s}{\frac{1}{2}\,ay_s} = j2a^2U_{\text{н.ф}} = ja^2\,\frac{2}{\sqrt{3}}\,U = ja^2\,1{,}15\,U. \tag{225}$$

Мощность конденсаторной батареи в фазе A

$$P_{кA} = \dot{I}_A \overset{*}{\dot{U}}_{кA} = jU_{н.ф}y_s(-j)\,2aU_{н.ф} = 2U^2_{н.ф}y_s\,e^{j120^\circ} =$$

$$= 2U^2_{н.ф}\,|y_s|\,e^{-j30^\circ}e^{j120^\circ} = j2U^2_{н.ф}|y_s|. \qquad (226)$$

Напряжение конденсаторной батареи, шунтирующей фазу C, равно фазному напряжению,

$$\dot{U}_{кC} = ja^2U_{н.ф}. \qquad (227)$$

Ток конденсаторной батареи C

$$\dot{I}_{кC} = \dot{U}_{кC}y_c = ja^2U_{н.ф}ay_s = jU_{н.ф}y_s.$$

Мощность конденсаторной батареи

$$P_{kC} = I_{kC}\overset{*}{\dot{U}}_{kC} = jU_{н.ф}y_s\,(-j)\,aU_{н.ф} = U^2_{н.ф}e^{j(120^\circ-30^\circ)}|y_s| = jU^2_{н.ф}|y_s|. \qquad (228)$$

Суммарная реактивная мощность конденсаторов

$$P_k = P_{kA} + P_{kc} = 3U^2_{н.ф}\,|y_s|. \qquad (229)$$

Номинальная мощность двигателя

$$P_{н} = 3U_{н.ф}I_{н.ф}\cos\varphi\cdot\eta = 3U^2_{н.ф}\,|y_s|\cos\varphi\eta$$

Поэтому отношение мощности конденсаторов к номинальной

$$\frac{P_{к}}{P_{н}} = \frac{1,15}{\eta}. \qquad (230)$$

Мощность конденсаторных батарей в уравновешенном режиме равна кажущейся мощности двигателя; $^2/_3$ мощности конденсаторов включаются последовательно с фазой A; мощность же конденсаторов шунтирующих фазу C равна $^1/_3$ общей мощности конденсаторов. В уравновешенном режиме напряжение на конденсаторах A в два раза больше, чем напряжение конденсаторной батареи, шунтирующей фазу C.

Рабочие, механические и токовые характеристики

Уравновешенный режим однофазного двигателя с последовательно-параллельным включением обмоток может быть получен только при внутреннем коэффициенте мощности двигателя $\cos\varphi = 0{,}866$. Такой коэффициент мощности имеют высокоскоростные трехфазные двигатели. Применение последовательно-параллельного включения целесообразно поэтому для двигателей мощностью $P > 1$ *квт* при синхронной скорости $n = 1500$, 3000 об/мин. Не может служить препятствием для использования рассматриваемой схемы некоторое отклонение коэффициен-

та мощности от значения 0,866, при котором достигается уравновешенный режим.

На рис. 40, 41, 42 приведены рабочие, механические и токовые характеристики двигателя А 41-4, мощностью 1,7 *квт* в однофазном режиме при последовательно-параллельном включении обмоток. Номинальный коэффициент мощности $\cos\varphi = 0{,}82$.

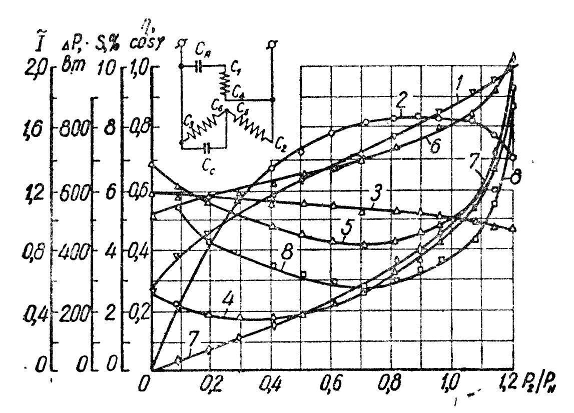


Рис. 40. Рабочие характеристики двигателя А 41-4 в однофазном режиме при последовательно-параллельном включении обмоток.
($C_A = 28$ *мкф*, $C_C = 56{,}1$ *мкф*, $U_н = 380$ *в*, $P_н = 1{,}7$ *квт*, $I_н = 3{,}9$ *а*): *1*—$\cos\varphi$; *2*—η; *3*—$I_{C_1C_4}$; *4*—$I_{C_2C_5}$; *5*—$I_{C_3C_6}$; *6*—$I_{сети}$; *7*—$s\%$; *8*—Δp.

Номинальная проводимость фазы $y_н = 0{,}0177$ $1/ом$. В фазу *A* включена емкость $C_A = 28$ *мкф*, проводимость которой $y_A = \omega C_A = 314 \cdot 28 \cdot 10^{-6} = 0{,}0088$ $1/ом$. Фаза *C* шунтирована емкостью $C_c = 56{,}1$ *мкф*, проводимость которой $y_c = \omega C_c = 314 \cdot 56{,}1 \cdot 10^{-6} = 0{,}0176$ $1/ом$. Обе емкости подобраны так, что соотношения (222) удовлетворяются по модулю.

Как видно из рис. 40, при таких емкостях и токах $\bar{I}_A = 1{,}0$, $\bar{I}_B = 0{,}9$, $\bar{I}_C = 1{,}0$ двигатель развивает мощность $P_2/P_н = 1{,}0$. Коэффициент мощности двигателя опережающий и равен 0,86. К.п.д. составляет 0,82. Ток сети $\bar{I} = 1{,}6$ от номинального фазного тока двигателя.

При уменьшении нагрузки ток в фазе *A* увеличивается. На холостом ходу $\bar{I}_A = 1{,}18$. Ток в фазе *C*, шунтированной конденсаторами, падает при уменьшении нагрузки до $P_2/P_н = 0{,}7$, при дальнейшем уменьшении нагрузки до холостого хода возрастает до 1,35.

При холостом ходе двигатель перегревается, общие потери значительно больше, чем при номинальной нагрузке. При этом фазы нагреваются неравномерно. Зависимости к.п.д. и потерь от полезной мощности на валу показывают, что однофазный двигатель при последовательно-параллельном включении

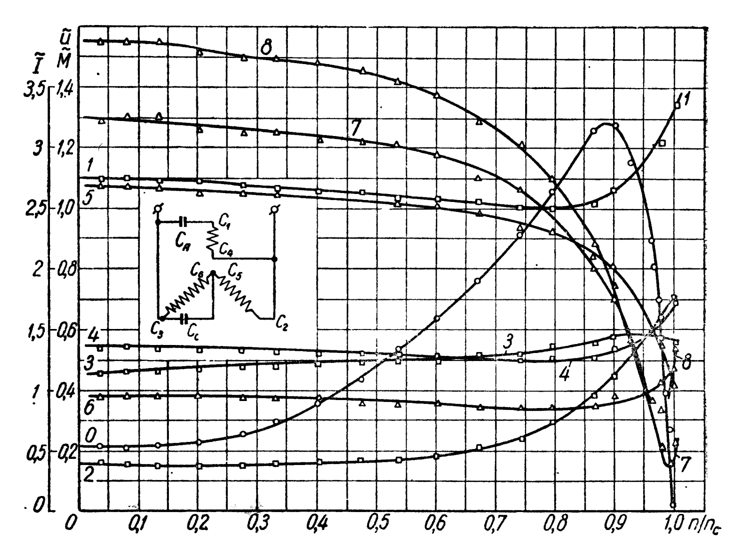


Рис. 41. Характеристики двигателя А 41-4 в однофазном режиме при последовательно-параллельном включении обмоток (C_A=28*мкф*, C_C=56,1 *мкф*, $U_н$=380 *в*, $P_н$=1,7 *квт*, $M_н$=1,17 *кгм*, $I_н$=3,9 *а*, n_c=1500 об/мин): 1—$\overline{U}_{CA}$; 2—$\overline{U}_{C_1C_4}$; 3—$\overline{U}_{C_2C_5}$; 4—$\overline{U}_{C_3C_6}$; 5—$\overline{I}_{сети}$; 6—$\overline{I}_{C_1C_4}$; 7—$\overline{I}_{C_2C_5}$; 8—$\overline{I}_{C_3C_6}$; 0—$\overline{M}$.

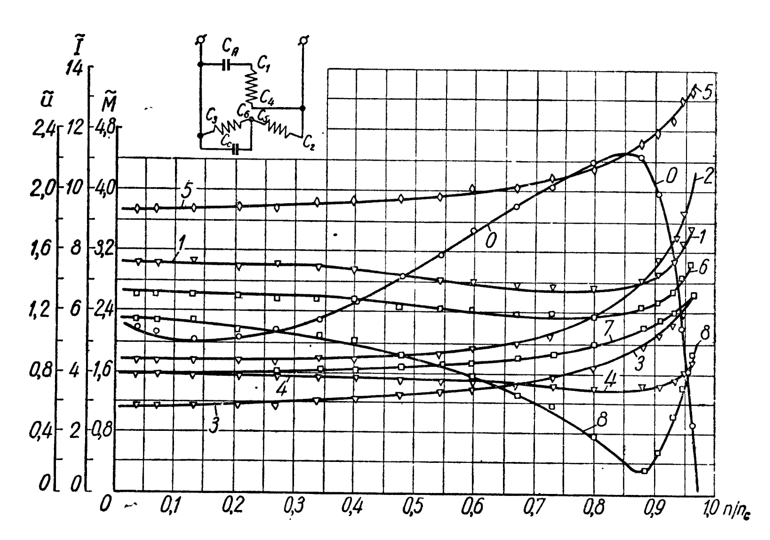


Рис. 42. Характеристики двигателя А 41-4 в однофазном режиме при последовательно-параллельном включении обмоток (C_A=140,5 *мкф*, C_C=282 *мкф*, $U_н$=380 *в*, $P_н$=1,7 *квт*, $I_н$=3,9 *а*, $M_н$=1,17 *кгм* n_c=1500 об/мин) 1—$\overline{U}_{CA}$; 2—$\overline{U}_{C_1C_4}$; 3—$\overline{U}_{C_2C_5}$; 4—$\overline{U}_{C_3C_6}$; 5—$\overline{I}_{сети}$; 6—$\overline{I}_{C_1C_4}$; 7—$\overline{I}_{C_2C_5}$; 8—$\overline{I}_{C_3C_6}$; 0—$\overline{M}$.

обмоток может работать при нагрузках не меньших, чем половина номинальной. Перегрузочный момент двигателя при рабочих емкостях больше номинального на 20—27%.

Как видно из кривых моментов на рис. 41 и 42, паразитные моменты от третьей пространственной гармоники не проявляются ни при рабочих, ни при пусковых емкостях. При рабочих емкостях пусковой момент составляет 0,21 номинального. Пусковой ток $\bar{I}=2{,}7$.

При пусковых емкостях $C_A = 140{,}5$ *мкф* и $C_C = 282$ *мкф*, пусковой момент составит 2,3 номинального, пусковой ток $\bar{I}_{п} = 9{,}3$. Максимальный момент двигателя $\bar{M}_{max} = 4{,}5$ номинального.

Для двигателя А 41-4 $y_к = k_i y_н = 4{,}1 \frac{3{,}9}{220} = 0{,}0727$ $1/ом$,

$\cos\varphi_к = 0{,}6$, $\sin\varphi_к = 0{,}8$, $y_0 = 0{,}075$ $1/ом$, $\cos\varphi_0 = 0{,}51$, $\sin\varphi_0 = 0{,}86$, $\bar{y}_0 = \frac{0{,}075}{0{,}0727} = 1{,}03$. При $C_A = 140{,}5$ *мкф*, $y_A = \omega C_A = 314 \cdot 140{,}5 \cdot 10^{-6} = 0{,}0441$ $1/ом$, $\bar{y}_A = \frac{0{,}0441}{0{,}0727} = 0{,}607$.

По (208) отношение пускового момента к таковому для трехфазного двигателя

$$\mu_п = \sqrt{3}\,\frac{[0{,}652 - 0{,}223 - 0{,}643] \cdot 0{,}6}{1{,}06 + 0{,}368 + 0{,}1355 + 0{,}39 - 1{,}03 - 0{,}395 - 1{,}072 - 0{,}357 + 1{,}042} =$$

$$= \frac{-\sqrt{3} \cdot 0{,}214 \cdot 0{,}6}{0{,}1415} = -1{,}57;\ |\mu_п| = 1{,}57.$$

Пусковой момент в трехфазном режиме двигателя (рис. 43)

$$\frac{M_{п.т}}{M_н} = 1{,}46 \text{ при } M_н = 1{,}17 \text{ кгм},$$

поэтому отношение пускового момента в однофазном режиме к номинальному

$$\frac{M_{п.о}}{M_н} = \mu_п \frac{M_{п.т}}{M_н} = 1{,}57 \cdot 1{,}46 = 2{,}29.$$

Согласно данным опыта (кривая *0* на рис. 42), пусковой момент в данном режиме $\mu_п = 2{,}3$.

Напряжения на конденсаторных батареях

В уравновешенном режиме напряжение на конденсаторах, шунтирующих фазу *C*, равно номинальному фазному напряжению

$$\bar{U}_{кс} = 0{,}578\ U_{сети}.$$

При уменьшении нагрузки на валу двигателя напряжение на конденсаторах C_c увеличивается, достигая на холостом ходу

$$U_{кc} = 1{,}2U_{н.ф}(\overline{U}_{кc} = 0{,}69).$$

При включенных пусковых емкостях напряжение на конденсаторах C_c увеличивается. При $n = 0$ $\overline{U}_{кc} = 0{,}8$. С увеличением ско-

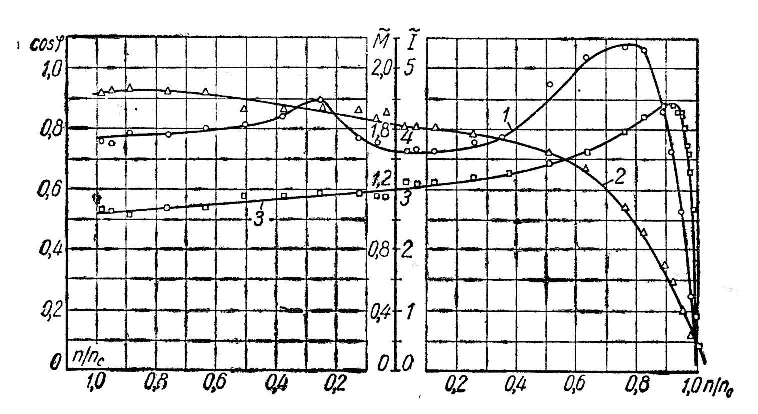


Рис. 43. Характеристики двигателя А 41-4 в симметричном трехфазном режиме

$U_{н.ф}=220$ *в*, $I_{н.ф}=3{,}9$ *а*, $P_н=1{,}7$ *квт*, $M_н=11{,}7$ *кгм*: 1—$\tilde{M}$; 2—$\tilde{I}$; 3—$\cos\varphi$.

рости до $n/n_c = 0{,}85$ напряжение на конденсаторах C_c уменьшается, а при дальнейшем разгоне возрастает до $\overline{U}_{кc} = 0{,}96$.

Напряжение на конденсаторах в фазе A в уравновешенном режиме в два раза больше номинального фазного напряжения и равно $1{,}15\ U_{сети}$.

На холостом ходу двигателя при рабочих емкостях напряжение на конденсаторах C_A на 16% больше, чем в уравновешенном режиме, т. е.

$$\overline{U}_{кA} = 1{,}34\ (U_{кA} = 1{,}16 \cdot 2U_{н.ф}).$$

При пусковых емкостях и неподвижном роторе напряжение на конденсаторах $\overline{U}_{кA} = 1{,}52$.

Если $n/n_c = 0{,}8$, то $\overline{U}_{кA} = 1{,}34$. На холостом ходу при включенных пусковых емкостях $\overline{U}_{кA} = 1{,}76$.

Напряжения на конденсаторах зависят от величины пусковой емкости. При меньших, чем принято при испытаниях двигателя А41-4 (см. рис. 42), значениях емкостей напряжения на конденсаторах меньше. При непродолжительном пуске, а также при автоматическом управлении пуском напряжение на конденсаторах можно выбирать по режиму холостого хода.

При отключении двигателя от сети конденсаторы C_A и три

последовательно включенные обмотки статора соединяются последовательно. В нормальном режиме проводимость конденсаторов равна половине проводимости фазы. Сопротивление емкости C_A больше сопротивления фазы. При последовательном включении фаз индуктивное сопротивление увеличивается. Поэтому цепь, состоящую из емкости C_A и обмоток C_1C_4, C_2C_5 и C_3C_6 приближается к резонансу.

На рис. 44 приведены осциллограммы напряжения на конденсаторах при пуске и отключении двигателя с рабочими ем-

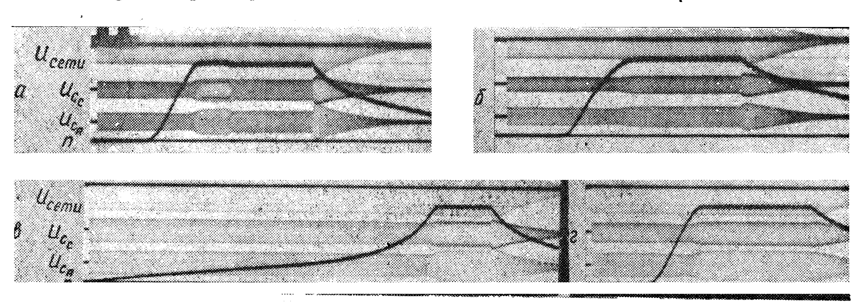


Рис. 44. Напряжения на конденсаторах при включении и отключении двигателя А 41-4 при напряжении сети 280 *в* (*а*, *б*) и 380 *в* (*в*, *г*):
а, *в*—C_A=28 *мкф*, C_C=56 *мкф*; *б* и *г*—C_A=28 *мкф*, C_C=0.

костями при напряжениях сети на холостом ходу двигателя 280 и 380 *в*. Осциллограммы показывают, что при отключении двигателя от сети с напряжением 280 *в* обмотки и конденсаторы подвергаются значительным перенапряжениям. В схеме с двумя емкостями эти перенапряжения значительно больше, чем в схеме с одной емкостью в фазе *А*; напряжение достигает 160% значения на холостом ходу. При отключениях двигателя от сети 380 *в* и двух емкостях напряжение обмоток и конденсаторов при отключении на 20% больше, чем на холостом ходу двигателя. Когда емкость C_c отключена, повышение напряжения для данного двигателя незначительно.

Глава V

ОКД С ТРЕХФАЗНОЙ ОБМОТКОЙ СТАТОРА, СОЕДИНЕННОЙ В ЗВЕЗДУ

Основные уравнения

В тех случаях, когда обмотка статора двигателя включена в звезду, а нулевая точка не выведена, оказывается необходимым включать трехфазные двигатели в сеть однофазного переменного тока с напряжением, равным линейному напряжению двигателя. Для полного использования мощности габарита применяется два типа фазосдвигающих сопротивлений: индуктивное и емкостное. Рассмотрим схему однофазного двигателя, показанную на рис. 45.

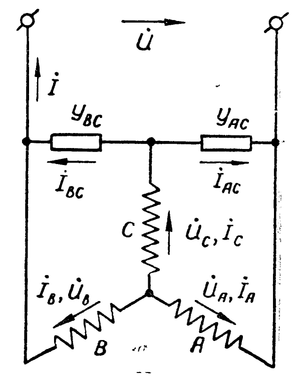


Рис. 45. Схема включения двигателя при соединении обмоток статора в звезду и обозначения.

Проводимости y_{BC} и y_{AB} будем принимать активно-индуктивными

$$y_{AC} = g_{AC} - jb_{AC} = |y_{AC}| e^{-j\varphi_{AC}},$$

$$y_{BC} = g_{BC} - jb_{BC} = |y_{BC}| e^{-j\varphi_{BC}}.$$

Уравнения включения двигателя, как видно из рис. 45, на основе законов Кирхгофа записываются в таком виде:

$$\dot I + \dot I_{AC} + \dot I_A = 0, \tag{231}$$

$$\dot I_A + \dot I_B + \dot I_C = 0, \tag{232}$$

$$\dot I_C = \dot I_{AC} + \dot I_{BC}, \tag{233}$$

$$\dot U = \dot U_{AC} - \dot U_{BC}, \tag{234}$$

$$U = \dot U_A - \dot U_B, \tag{235}$$

$$\dot{U}_B - \frac{\dot{I}_{BC}}{y_{BC}} - \dot{U}_C = 0, \quad (236)$$

$$\dot{I}_{AC} = (\dot{U}_A - \dot{U}_C) y_{AC}, \quad (237)$$

$$\dot{I}_{BC} = (\dot{U}_B - \dot{U}_C) y_{BC}. \quad (238)$$

Связь между напряжениями и токами фаз определяем методом симметрических составляющих. Уравнения разложения токов и напряжений трехфазной машины с симметричными обмотками принимаем по (1).

Из уравнения (232) следует, что токи и напряжения нулевой последовательности

$$\dot{U}_0 = \dot{I}_0 = 0.$$

Подставляя в (235) и (233) значения симметричных составляющих, находим уравнения двигателя через напряжения прямой и обратной последовательностей

$$\dot{U} = \dot{U}_1 (1 - a^2) + \dot{U}_2 (1 - a),$$

$$0 = \dot{U}_1 [a y_1 + a y_{AC} + a y_{BC} - y_{AC} - a^2 y_{BC}) +$$

$$+ \dot{U}_2 (a^2 y_2 + a^2 y_{AC} + a^2 y_{BC} - y_{AC} - a y_{BC}). \quad (239)$$

После решения этих уравнений и преобразования получаем значение напряжений прямой и обратной последовательностей

$$\dot{U}_1 = \dot{U} \frac{a^2 y_2 + (a^2 - 1) y_{AC} + (a^2 - a) y_{BC}}{(a^2 - a)(y_1 + y_2 + 3 y_{AC} + 3 y_{BC})}, \quad (240)$$

$$\dot{U}_2 = \dot{U} \frac{a y_1 + (a - 1) y_{AC} + (a - a^2) y_{BC}}{(a^2 - a)(y_1 + y_2 + 3 y_{AC} + 3 y_{BC})}. \quad (241)$$

Относительные значения напряжений прямой и обратной последовательностей

$$\overline{U}_1 = \frac{j a^2 [y_2 + (1 - a) y_{AC} + (1 - a^2) y_{BC}]}{y_1 + y_2 + 3 y_{AC} + 3 y_{BC}}, \quad (240a)$$

$$\overline{U}_2 = \frac{-j a [y_1 + (1 - a^2) y_{AC} + (1 - a) y_{BC}]}{y_1 + y_2 + 3 y_{AC} + 3 y_{BC}}, \quad (241a)$$

Выразим параметры через модули и фазы

$$y_1 = |y_1| e^{-j\varphi_1},\ y_2 = |y_2| e^{-j\varphi_2},\ y_{AC} = |y_{AC}| e^{-j\varphi_{AC}},\ y_{BC} = |y_{BC}| e^{-j\varphi_{BC}},$$

$$a = e^{j120^\circ},\ a^2 = e^{j240^\circ},\ 1 - a^2 = \sqrt{3} e^{j30^\circ},\ 1 - a = \sqrt{3} e^{-j30^\circ};$$

получаем относительные значения в таком виде (обозначение моду-

лей опускаем):

$$\bar{U}_1 = \frac{e^{-j30^\circ}\left[y_2 e^{-j\varphi_2} \sqrt{3} y_{AC} e^{+j(\varphi_{AC}+30^\circ)} + \sqrt{3} y_{BC} e^{-j(\varphi_{BC}-30^\circ)}\right]}{y_1 e^{-j\varphi_1} + y_2 e^{-j\varphi_2} + 3y_{AC} e^{-j\varphi_{AC}} + 3y_{BC} e^{-j\varphi_{BC}}}, \qquad (240б)$$

$$\bar{U}_2 = \frac{e^{j30^\circ}\left[y_1 e^{-j\varphi_1} + \sqrt{3} y_{AC} e^{-j(\varphi_{AC}-30^\circ)} + \sqrt{3} y_{BC} e^{-j(\varphi_{BC}+30^\circ)}\right]}{y_1 e^{-j\varphi_1} + y_2 e^{-j\varphi_2} + 3y_{AC} e^{-j\varphi_{AC}} + 3y_{BC} e^{-j\varphi_{BC}}}. \qquad (241б)$$

В дальнейшем выражаем относительные значения напряжений прямой и обратной последовательностей через активные и реактивные составляющие проводимостей

$$U_1 = \frac{\frac{\sqrt{3}}{2} g_2 - \frac{b_2}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} g_{AC} - \frac{3}{2} b_{AC} + \sqrt{3} g_{BC} - j\left[\frac{g_2}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} b_2 + \frac{3}{2} g_{AC} + \frac{\sqrt{3}}{2} b_{AC} + \sqrt{3} b_{BC}\right]}{g - jb}, \qquad (240\text{ в})$$

$$\bar{U}_2 = \frac{-\left(\frac{\sqrt{3}}{2} g_1 + \frac{b_1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} g_{AC} + \frac{3}{2} b_{AC} + \sqrt{3} g_{BC}\right) + j\left(-\frac{g_1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} b_1 - \frac{3}{2} g_{AC} + \frac{\sqrt{3}}{2} b_{AC} + \sqrt{3} b_{BC}\right)}{g - jb}, \qquad (241\text{ в})$$

где

$$g = g_1 + g_2 + 3g_{AC} + 3g_{BC};\quad b = b_1 + b_2 + 3b_{AC} + 3b_{BC}.$$

Подставляя значения напряжений прямой и обратной составляющих в уравнения (1), находим ток сети и токи фаз

$$I = U\frac{y_1 y_2 + (y_1 + y_2)(y_{AC} + y_{BC}) + 3y_{BC} y_{AC}}{y_1 + y_2 + 3y_{AC} + 3y_{BC}}, \qquad (242)$$

$$I_A = \dot{U}\frac{y_1 y_2 + (y_1 + y_2) y_{BC} - (a y_1 + a^2 y_2) y_{AC}}{y_1 + y_2 + 3y_{AC} + 3y_{BC}}, \qquad (243)$$

$$I_B = \dot{U}\frac{y_{BC}(a^2 y_1 + y_2) - y_1 y_2 - (y_1 + y_2) y_{AC}}{y_1 + y_2 + 3y_{AC} + 3y_{BC}}, \qquad (244)$$

$$\dot{I}_C = \dot{U}\frac{(a y_1 + a^2 y_2) y_{BC} - y_{AC}(a^2 y_1 + a y_2)}{y_1 + y_2 + 3y_{AC} + 3y_{BC}}. \qquad (245)$$

Ток в проводимостях y_{AC} и y_{BC}

$$\dot{I}_{AC} = \dot{U}\frac{3y_{BC}y_{AC} - y_{AC}(ay_2 + a^2y_1)}{y_1 + y_2 + 3y_{AC} + 3y_{BC}}, \qquad (246)$$

$$\dot{I}_{BC} = \dot{U}\frac{y_{BC}(a^2y_2 + ay_1) - 3y_{AC}y_{BC}}{y_1 + y_2 + 3y_{AC} + 3y_{BC}}. \qquad (247)$$

Уравновешенный режим

Определим соотношения между параметрами схемы, при которых двигатель работает в уравновешенном режиме и обратно вращающееся поле отсутствует.

Предположим, что в уравновешенном режиме нет поля, обозначаемого индексами 2. При этом $\dot{U}_2 = 0$. Тогда соотношения параметров удовлетворяют уравнению, получаемому из (241).

$$ay_1 + (a - 1)y_{AC} + (a - a^2)y_{BC} = 0. \qquad (248)$$

Здесь параметры являются комплексами. При подстановке значений комплексов через модули и фазы находим два уравнения, которые легко получить из (241 б).

$$y_1 \cos\varphi_1 + \sqrt{3}\, y_{AC}\cos(\varphi_{AC} - 30^\circ) + \sqrt{3}\, y_{BC}\cos(\varphi_{BC} + 30^\circ) = 0,$$

$$(248\ \text{а})$$

$$y_1 \sin\varphi_1 + \sqrt{3} y_{AC}\sin(\varphi_{AC} - 30^\circ) + \sqrt{3}\, y_{BC}\sin(\varphi_{BC} + 30^\circ) = 0.$$

При заданных фазовых углах используемых проводимостей y_{AC} и y_{BC} можно легко определить модули

$$\bar{y}_{AC} = \frac{y_{AC}}{y_1} = \frac{1}{\sqrt{3}}\frac{\sin(\varphi_1 - \varphi_{BC} - 30^\circ)}{\sin(\varphi_{BC} - \varphi_{AC} + 60^\circ)}, \qquad (249)$$

$$\bar{y}_{BC} = \frac{y_{BC}}{y_1} = \frac{1}{\sqrt{3}}\frac{\sin(\varphi_1 - \varphi_{AC} + 30^\circ)}{\sin(\varphi_{AC} - \varphi_{BC} - 60^\circ)}. \qquad (250)$$

Полученные соотношения хотя и не достаточно наглядны, но дают возможность определить проводимости y_{AC} и y_{BC} при любых заданных фазовых углах.

Из (241 в) находим уравнения для параметров, выраженных через активные и реактивные составляющие,

$$\frac{\sqrt{3}}{2}g_1 + \frac{b_1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}g_{AC} + \frac{3}{2}b_{AC} + \sqrt{3}g_{BC} = 0,$$

$$(248\ \text{б})$$

$$-\frac{g_1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}b_1 - \frac{3}{2}g_{AC} + \frac{\sqrt{3}}{2}b_{AC} + \sqrt{3}b_{BC} = 0.$$

Полученные уравнения связывают четыре неизвестные величины.

Для решения задачи необходимы дополнительные соотношения, характеризующие добротность используемых реактивных сопротивлений, например тангенс угла диэлектрических потерь конденсаторов.

Определим величины реактивных проводимостей, если активные равны нулю

$$g_{BC} = 0, \quad g_{AC} = 0.$$

Тогда

$$\frac{\sqrt{3}}{2} g_1 + \frac{b_1}{2} = -\frac{3}{2} b_{AC},$$

$$-\frac{g_1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} b_1 + \frac{\sqrt{3}}{2} b_{AC} + \sqrt{3}\, b_{BC} = 0,$$

отсюда

$$-b_{AC} = \frac{g_1}{\sqrt{3}} + \frac{b_1}{3},$$

$$b_{BC} = \frac{g_1}{\sqrt{3}} - \frac{b_1}{3}.$$

Определим относительное значение проводимостей

$$\bar{b}_{AC} = \frac{b_{AC}}{|y_1|} = -\frac{\cos\varphi_1}{\sqrt{3}} - \frac{\sin\varphi_1}{3}, \tag{251}$$

$$\bar{b}_{BC} = \frac{b_{BC}}{|y_1|} = \frac{\cos\varphi_1}{\sqrt{3}} - \frac{\sin\varphi_1}{3}. \tag{252}$$

Из полученных соотношений следует, что проводимость b_{AC} должна быть емкостью, а проводимость b_{BC} — индуктивностью.

Поэтому в уравнениях (249) и (250) необходимо принимать

$$\varphi_{AC} < 0 \text{ и } \varphi_{BC} > 0.$$

При $\varphi_{AC} = -90°$ (емкость без потерь) и $\varphi_{BC} = 90°$ (индуктивность без потерь) соотношения (249) и (250), (251) и (252) дают одинаковые результаты:

$$\bar{y}_{AC} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\sin(\varphi_1 - 120°)}{\sin 240°} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\cos(30° - \varphi_1)}{\frac{\sqrt{3}}{2}} = \frac{\cos\varphi_1}{\sqrt{3}} + \frac{\sin\varphi_1}{3}, \tag{249 a}$$

$$\bar{y}_{BC} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\sin(\varphi_1 + 120°)}{-\sin 240°} = \frac{2}{3}\cos(30° + \varphi_1) = \frac{\cos\varphi_1}{\sqrt{3}} - \frac{\sin\varphi_1}{3}. \tag{250 a}$$

В уравновешенном режиме напряжения определяются такими

соотношениями:

$$\bar{U}_1 = \frac{a^2}{a^2 - a}\sqrt{3}, \quad (253)$$

$$\dot{U}_A = \dot{U}_{н.ф}\frac{a^2\sqrt{3}}{a^2 - a}, \; \dot{U}_B = U_{н.ф}\frac{a\sqrt{3}}{a^2 - a}, \; \dot{U}_C = \dot{U}_{н.ф}\frac{\sqrt{3}}{a^2 - a}, \quad (254)$$

$$\dot{U}_{AC} = \dot{U}_A - \dot{U}_C = -a\sqrt{3}U_{н.ф},$$

$$U_{BC} = \dot{U}_B - U_C = a^2\sqrt{3}\,U_{н.ф}. \quad (255)$$

Реактивная мощность конденсаторной батареи в уравновешенном режиме

$$P_{кр} = U_{AC}^2 b_{AC} = (\sqrt{3}U_{н.ф})^2 y_1\left[\frac{\cos\varphi_1}{\sqrt{3}} + \frac{\sin\varphi_1}{3}\right].$$

Реактивная мощность дросселя в уравновешенном режиме

$$P_{др} = U_{BC}^2 b_{BC} = (\sqrt{3}U_{н.ф})^2 y_1\left[\frac{\cos\varphi_1}{\sqrt{3}} - \frac{\sin\varphi_1}{3}\right].$$

Полезная мощность двигателя в номинальном режиме

$$P_н = 3U_{н.ф}^2 y_1 \cos\varphi_1,$$

поэтому относительное значение реактивных мощностей может быть определено формулами

$$\bar{P}_{кр} = \frac{P_{кр}}{P_н} = \frac{1}{\eta}\left[\frac{1}{\sqrt{3}} + \frac{\operatorname{tg}\varphi_1}{3}\right], \quad (256)$$

$$\bar{P}_{др} = \frac{P_{др}}{P_н} = \frac{1}{\eta}\left[\frac{1}{\sqrt{3}} - \frac{\operatorname{tg}\varphi_1}{3}\right]. \quad (257)$$

Полученные соотношения показывают, что чем выше коэффициент мощности двигателя, тем меньше мощность конденсаторной батареи и тем большая мощность дросселя требуется для получения уравновешенного режима.

Мощности дросселя и конденсаторной батареи при включении обмоток статора в звезду и в треугольник одинаковы. Их можно определить по рис. 46.

Пусковой режим

Относительное значение пускового момента может быть определено через напряжения прямой и обратной последовательностей по (87).

Подставляя значения напряжений и принимая во внимание, что $y_1 = y_2$, $g_1 = g_2$, $b_1 = b_2$, находим

$$\mu_п = 2\sqrt{3}\,\frac{g_1(b_{BC} - b_{AC}) - b_1(g_{BC} - g_{AC}) + 3(b_{BC}g_{AC} - g_{BC}b_{AC})}{g^2 + b^2}. \qquad (258)$$

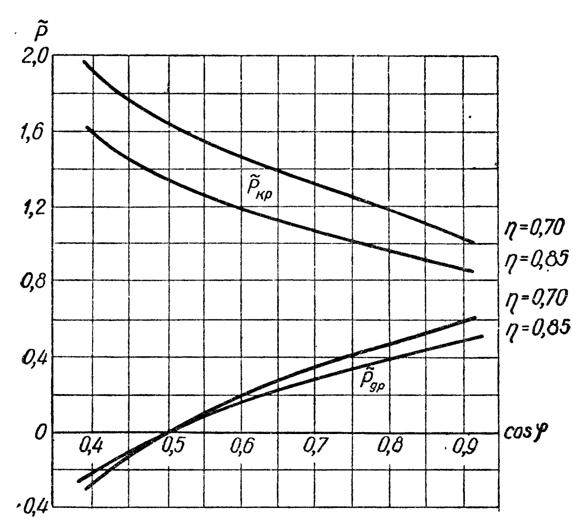


Рис. 46. Мощность дросселя и конденсаторной батареи для получения уравновешенного режима в зависимости от коэффициента мощности двигателя.

Подставляя значения напряжений прямой и обратной последовательностей, выраженные через модули и аргументы проводимостей, получаем

$$\mu_п = 2\sqrt{3}\,\frac{y_к y_{AC}\sin(\varphi_к - \varphi_{AC}) + y_к y_{BC}\sin(\varphi_{BC} - \varphi_к) + 3y_{AC}y_{BC}\sin(\varphi_{BC} - \varphi_{AC})}{4y_к^2 + 9y_{AC}^2 + 9y_{BC}^2 + 12y_к y_{AC}\cos(\varphi_к - \varphi_{AC}) + 12y_к y_{BC}\cos(\varphi_к - \varphi_{BC}) + 18y_{AC}y_{BC}\cos(\varphi_{AC} - \varphi_{BC})}. \qquad (259)$$

Значения параметров можно выразить в долях номинальной проводимости фазы двигателя трехфазного режима.

При этом $y_к = k_i y_н$, где k_i — кратность пускового тока; $\bar{y}_{BC} = \frac{y_{BC}}{y_н}$ — коэффициент проводимости индуктивности; $\bar{y}_{AC} = \frac{y_{AC}}{y_н}$ — коэффициент проводимости емкости, а соотношение для пускового момента

принимает вид

$$\mu_п=2\sqrt{3}\frac{\bar{y}_{AC}k_i\sin(\varphi_к-\varphi_{AC})+k_i\bar{y}_{BC}\sin(\varphi_{BC}-\varphi_к)+3\bar{y}_{BC}\bar{y}_{AC}\sin(\varphi_{BC}-\varphi_{AC})}{4k_i^2+9(\bar{y}_{BC}^2+\bar{y}_{AC}^2)+12k_i[\bar{y}_{BC}\cos(\varphi_к-\varphi_{BC})+\bar{y}_{AC}\cos(\varphi_к-\varphi_{AC})]+18\bar{y}_{BC}\bar{y}_{AC}\cos(\varphi_{AC}-\varphi_{BC})} \qquad (260)$$

Полученное соотношение позволяет определить величину пускового момента при любом типе проводимостей.

Ранее нами было принято, что проводимости y_{AC} и y_{BC} индуктивные. Из уравнений (251) и (252) следует, что обратно вращающееся поле будет равно нулю при шунтировании фаз A и C емкостью, а фаз B и C — индуктивностью.

Знаки при b_{AC} и b_{BC} противоположны. В уравнениях (259) и (260) можно принять углы $\varphi_к$ и φ_{BC} положительными, а угол φ_{AC} — отрицательным.

В некоторых случаях можно принять, что $\varphi_{AC}=-90°$ и $\varphi_{BC}=$ $=90°$.

Относительное значение пускового момента при этом записывается в таком виде:

$$\mu_п=2\sqrt{3}\frac{(\bar{y}_{BC}+\bar{y}_{AC})k_i\cos\varphi_к}{4k_i^2+9(\bar{y}_{BC}-\bar{y}_{AC})^2+12(\bar{y}_{BC}-\bar{y}_{AC})k_i\sin\varphi_к}. \qquad (261)$$

Относительное значение пускового момента зависит от величины емкости и индуктивности, а также от параметров короткого замыкания. Если $\bar{y}_{BC}$ и $\bar{y}_{AC}$ таковы, что при неподвижном роторе в воздушном зазоре двигателя возникает круговое вращающееся поле

$$\bar{y}_{BC}=\frac{b_{BC}}{y_н}=k_i\left[\frac{\cos\varphi_к}{\sqrt{3}}-\frac{\sin\varphi_к}{3}\right],$$

$$\bar{y}_{AC}=\frac{b_{AC}}{y_н}=k_i\left[\frac{\cos\varphi_к}{\sqrt{3}}+\frac{\sin\varphi_к}{3}\right], \qquad (262)$$

то относительное значение пускового момента равно единице, т. е. равно пусковому моменту трехфазного двигателя. В этом можно убедиться при подстановке (262) в (261).

При выборе y_{BC} и y_{AC} по уравнениям (262) в воздушном зазоре двигателя возникает круговое вращающееся поле, напряжения фаз равны номинальному и условия работы двигателя такие, как при включении в трехфазную сеть. На практике обычно в процессе пуска изменяют только одно сопротивление.

Если в процессе пуска изменять индуктивность, оставляя

емкость неизменной, равной рабочей емкости, то величина пускового момента невелика. Например, для двигателя А 42-4 мощностью 2,8 *квт* максимальное значение пускового момента в этом случае равно 0,13 пускового момента при симметричной работе, что составляет 0,247 номинального (рис. 47, кривая *1*). Такое отношение пускового и номинального моментов не может удовлетворить требованиям ряда приводов. Более приемлемы пусковые характеристики двигателя при использовании пусковых емкостей. Для двигателя А 42-4 (рис. 47, кривая *2*) при неизменной индуктивности, выбранной из условий номинального режима, и переменной емкости максимальный пусковой момент в однофазном режиме на 15% больше пускового момента двигателя в симметричном режиме.

Рассматривая соотношение (259) как функцию y_{AC}, определим экстремальное значение пускового момента в таком виде:

$$\mu_{п.э} = \frac{2\sqrt{3}A^2}{\pm 18\sqrt{B^2 + A^2D - ACB} + 9AC - 18B}, \qquad (263)$$

которое имеет место при относительной проводимости

$$\bar{y}_{ACэ} = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 + A^2D - ACB}}{A}, \qquad (264)$$

где

$$\begin{aligned} A &= k_i \sin(\varphi_k - \varphi_{AC}) + 3\bar{y}_{BC}\sin(\varphi_{BC} - \varphi_{AC}); \\ B &= k_i\bar{y}_{BC}\sin(\varphi_{BC} - \varphi_k); \\ C &= \frac{4}{3}k_i\cos(\varphi_k - \varphi_{AC}) + 2\bar{y}_{BC}\cos(\varphi_{AC} - \varphi_{BC}); \\ D &= \frac{4}{9}k_i^2 + y_{BC}^2 + \frac{4}{3}k_i\bar{y}_{BC}\cos(\varphi_k - \varphi_{BC}). \end{aligned} \qquad (265)$$

Расчеты показывают, что максимальный пусковой момент получается, если перед корнем в (263) и (264) стоит плюс. Экстремальное значение пускового момента и значение проводимости $\bar{y}_{ACэ}$, при которых пусковой момент достигает максимума, зависят от параметров двигателя, величины проводимости y_{BC} и фазовых углов проводимостей y_{BC} и y_{AC}.

Можно принять, что $\varphi_{BC} = 90°$. Проводимость y_{BC} определяется из условий номинального режима по соотношению (252). При этих допущениях значения коэффициентов приобретают вид

$$\begin{aligned} A &= k_i \sin(\varphi_k - \varphi_{AC}) + 3\bar{y}_{BC}\cos\varphi_{AC}; \\ B &= k_i\bar{y}_{BC}\cos\varphi_k, \end{aligned} \qquad (265\,а)$$

$$C = \frac{4}{3} k_i \cos(\varphi_k - \varphi_{AC}) + 2\bar{y}_{BC} \sin \varphi_{AC}, \qquad (265а)$$

$$D = \frac{4}{9} k_i^2 + \bar{y}_{BC}^2 + \frac{4}{3} k_i \bar{y}_{BC} \sin \varphi_k.$$

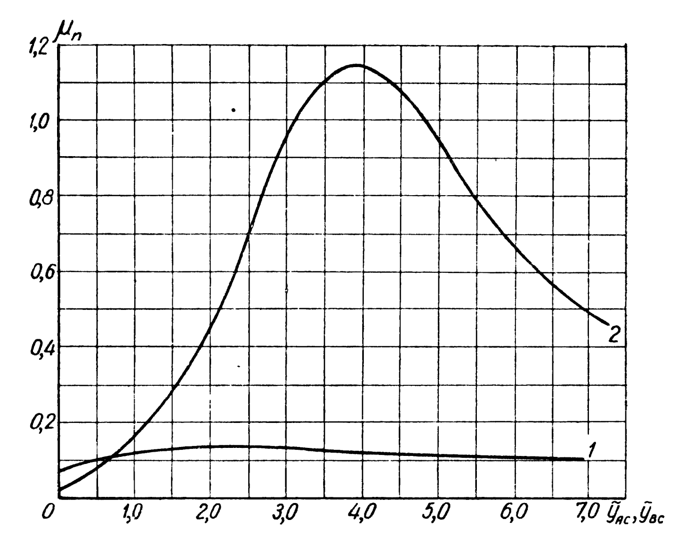


Рис. 47. Зависимость пускового момента от проводимости конденсаторной батареи или катушки индуктивности при $\kappa_i = 5{,}5$, $\cos\varphi_\kappa = 0{,}54$, $\cos\varphi_н = 0{,}84$ (А 42- 4):

$1 - \mu_п = f(\bar{y}_{BC})$ при $\bar{y}_{AC} = 0{,}665 = \text{const}$; $2 - \mu_п = f(\bar{y}_{AC})$ при $(\bar{y}_{BC}) = 0{,}303 = \text{const}$.

В частном случае конденсаторного пуска, когда углом потерь $\text{tg}\,\delta$ можно пренебречь, принимая $\varphi_{AC} = -90°$, значения коэффициентов определяются такими соотношениями:

$$A = k_i \cos \varphi_k, \qquad B = k_i \bar{y}_{BC} \cos \varphi_k,$$

$$C = -\frac{4}{3} k_i \sin \varphi_k - 2\bar{y}_{BC}, \qquad (265б)$$

$$D = \frac{4}{9} k_i^2 + \bar{y}_{BC}^2 + \frac{4}{3} k_i \bar{y}_{AB} \sin \varphi_k.$$

Как показали Некрасов О. А. и Рекус Г. Г. [101] для конденсаторных двигателей с параллельно соединенными обмотками статора в некоторых случаях целесообразно для уменьшения величины пусковой емкости применить активное пусковое сопротивление, шунтирующее емкость.

Недостаток такой схемы пуска однофазных двигателей заключается в значительном влиянии паразитных моментов от третьей пространственной гармоники.

При соединении обмоток статора в звезду токи нулевой последовательности равны нулю. Третьи пространственные гармоники не проявляются. Поэтому приобретает большое значение зависимость пускового момента двигателя от активной состав-

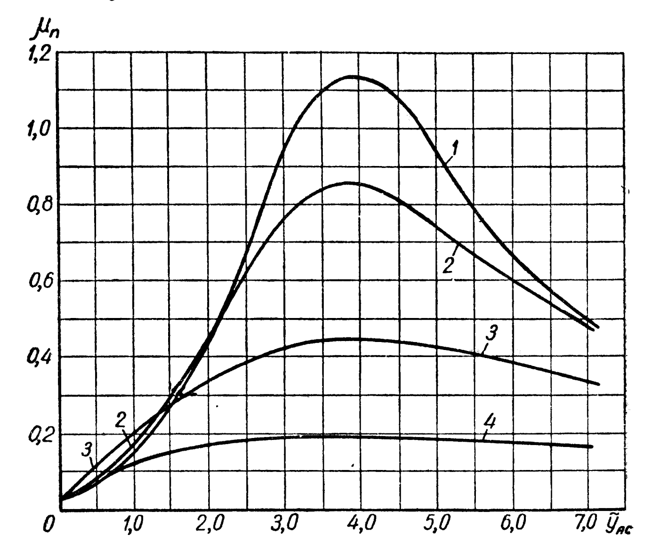


Рис. 48. Зависимость пускового момента от величины и фазы проводимости $\bar{y}_{AC}$ при $\bar{y}_{BC}$= const (k_i=5,5 cos φк=0,54, $\bar{y}_{BC}$=303): *1*—φ_{AC}=—90°, *2*—φ_{AC}=—30°; *3*—φ_{AC}=—50°, *4*-φ_{AC}=0.

ляющей проводимости. Выражения для пускового момента (258), (259), (260) позволяют установить интересующую нас зависимость. Можно воспользоваться также выражением пускового момента через коэффициенты *A, B, C, D*.

$$\mu_п = 0,385 \frac{A\bar{y}_{AC}}{\bar{y}_{AC}^2 + C\bar{y}_{AC} + D}. \qquad (266)$$

Анализ этого соотношения и расчеты показывают, что для рассматриваемой схемы однофазного двигателя шунтирование конденсаторной батареи на время пуска активным сопротивлением можно применять только при невысоких требованиях к пусковому моменту двигателя в однофазном режиме.

Как видно из кривых рис. 48 и 49, максимальное значение пускового момента очень резко изменяется при отклонении угла φ_{AC} от 90°. Величина проводимости, при которой момент достигает максимального значения, изменяется мало. При уменьшении пусковой емкости, например, в два раза фазовый угол

проводимости y_{AC} составит примерно 50°. При этом максимальное значение пускового момента уменьшается в 2,5 раза, т. е. составит приблизительно 0,86 номинального момента.

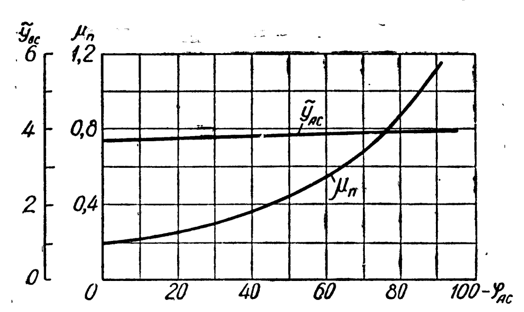


Рис. 49. Зависимость максимальной кратности пускового момента двигателя А 42-4 в однофазном режиме и проводимости $\bar{y}_{AC э}$ от аргумента $\bar{y}_{AC}$ (k_i=5,5, cos φ_K=0,54, $\bar{y}_{BC}$=0,303=const).

Примерно такое же значение пускового момента получаем при одной емкости без шунтирующего сопротивления (кривая *1* и *3*, рис. 4).

В области малых пусковых моментов, например, до 0,3 (т. е. 0,5—0,6 $M_н$) шунтирование может оказаться полезным. В начальной части кривой пусковой момент тем больше, чем больше активная составляющая проводимости.

Применение пусковых электролитических конденсаторов позволяет значительно уменьшить вес, габариты и стоимость конденсаторной батареи однофазного двигателя.

Расчеты характеристик с использованием круговых диаграмм и графических построений

Как показано в работе И. М. Постникова [54], использование круговых диаграмм и графических построений при расчетах характеристик ОКД позволяет значительно сократить объем вычислительных работ, сделать наглядными зависимости, контролировать правильность вычислений.

Если круговая диаграмма строится для токов какой-нибудь фазы, то проводимости прямой и обратной последовательностей связаны с токами круговой диаграммы соответствующими скольжению s и 2—s соотношениями

$$\dot{I}_s = U_{н.ф} y_1, \qquad \dot{I}_{2-s} = U_{н.ф} y_2, \tag{267}$$

где $U_{н.ф}$ — номинальное фазное напряжение.

Величины токов $\dot{I}_s$ і $\dot{I}_{2-s}$ могут быть использованы непосредственно при вычислениях напряжений прямой и обратной последовательности. Умножая числитель и знаменатель соотношений (240а) и (241а) на номинальное фазное напряжение и вводя обозначения

$$\dot{I}'_{AC} = U_{н.ф} y_{AC},$$
$$\dot{I}'_{BC} = U_{н.ф} y_{BC}, \tag{268}$$

находим

$$\overline{U}_1 = \frac{ja^2 [\dot{I}_{2-s} + (1-a)\dot{I}'_{AC} + (1-a^2)\dot{I}'_{BC}]}{\dot{I}_s + \dot{I}_{2-s} + 3(\dot{I}'_{AC} + \dot{I}'_{BC})}, \tag{269}$$

$$\overline{U}_2 = \frac{-ja[\dot{I}_s + (1-a^2)\dot{I}'_{AC} + (1-a)\dot{I}'_{BC}]}{\dot{I}_s + \dot{I}_{2-s} + 3(\dot{I}'_{AC} + \dot{I}'_{BC})}. \tag{270}$$

Обозначим

$$\dot{a} = \frac{\dot{I}_s + \dot{I}_{2-s}}{2} + \frac{3}{2}(\dot{I}'_{AC} + \dot{I}'_{BC}), \tag{271}$$

$$\dot{b} = \dot{I}_{2-s} + \sqrt{3}\,(e^{-j30^\circ} \cdot \dot{I}'_{AC} + e^{j30^\circ}\dot{I}'_{BC}), \tag{272}$$

$$\dot{c} = \dot{I}_s + \sqrt{3}\,(e^{j30^\circ}\dot{I}'_{AC} + e^{-j30^\circ}\dot{I}'_{BC}); \tag{273}$$

получаем комплексы относительных значений напряжений прямой и обратной последовательностей

$$\overline{U}_1 = e^{-j30^\circ}\frac{\dot{b}}{2\dot{a}}, \tag{274}$$

$$\overline{U}_2 = e^{j30^\circ}\frac{\dot{c}}{2\dot{a}}. \tag{275}$$

Для расчетов механических характеристик относительные значения напряжений определяются по модулю.

Напряжения фаз рассчитываются по соотношениям

$$\overline{U}_A = \overline{U}_1 + \overline{U}_2,\quad \overline{U}_B = a^2\overline{U}_1 + a\overline{U}_2,\quad \overline{U}_C = a\overline{U}_1 + a^2\overline{U}_2. \tag{276}$$

Здесь $\overline{U}_A$, $\overline{U}_B$, $\overline{U}_C$ — отношение комплексов напряжений фаз к номинальному фазному напряжению. Токи фаз могут быть определены по соотношениям (243) — (245), а также из уравнений

$$\dot{I}_A = \overline{U}_1\dot{I}_s + \overline{U}_2\dot{I}_{2-s},\quad \dot{I}_B = a^2\overline{U}_1\dot{I}_s + a\overline{U}_2\dot{I}_{2-s},$$
$$\dot{I}_C = a\overline{U}_1\dot{I}_s + a^2\overline{U}_2\dot{I}_{2-s}. \tag{277}$$

Ток сети можно определить на основании уравнений (231), (237), (277)

$$\dot{I} = \overline{U}_1[\dot{I}'_{AC}(a-1) - \dot{I}_s] + \overline{U}_2[\dot{I}'_{AC}(a^2-1) - \dot{I}_{2-s}]. \tag{278}$$

Подставляя значение оператора a находим

$$\dot{I} = -\{\overline{U}_1(\dot{I}_s + \sqrt{3}\,\dot{I}'_{AC}e^{-j30^\circ}) + \overline{U}_2(\dot{I}_{2-s} + \sqrt{3}\,\dot{I}'_{AC}e^{j30^\circ})\}. \tag{278 a}$$

Изменим направление вектора тока сети, т. е. пусть $\dot{I}' = -\dot{I}$, и введем обозначения

$$\dot{d} = \dot{I}_s + \sqrt{3}\,\dot{I}'_{AC}e^{-j30^\circ},$$

$$\dot{q} = \dot{I}_{2-s} + \sqrt{3}\,\dot{I}_{AC}e^{j30^\circ}; \qquad (279)$$

тогда для тока сети находим такое соотношение:

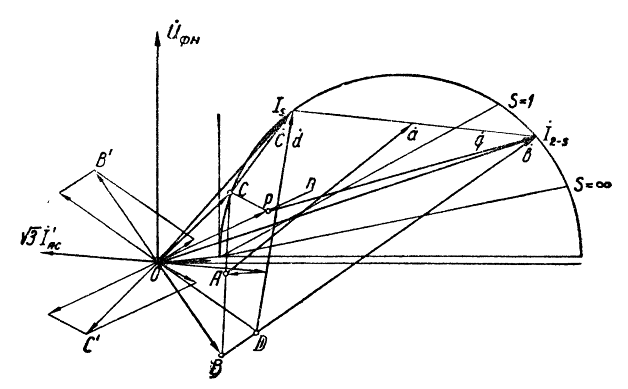


Рис. 50. Построение векторов $\dot{a}$, $\dot{b}$, $\dot{c}$, I_s I_{2-s}, $\dot{d}$, $\dot{q}$.

$$\dot{I}' = \overline{U}_1\dot{d} + \overline{U}_2\dot{q}. \qquad (280)$$

Построение векторов $\dot{a}$, $\dot{b}$, $\dot{c}$, $\dot{d}$, $\dot{q}$ показано на рис 50. Проводимость y_{AC} носит емкостный характер, проводимость y_{BC} — индуктивный. Ток $\dot{I}'_{AC}$ на векторной диаграмме опережает вектор напряжения $U_{н.ф}$ на угол, близкий 90°, а ток $\dot{I}'_{BC}$ отстает от напряжения $U_{н.ф}$ на угол φ_{BC}. Далее откладываем также векторы $\sqrt{3}\dot{I}'_{AC}$ и $\sqrt{3}\dot{I}'_{BC}$; они сдвинуты от векторов $\dot{I}'_{AC}$ и $\dot{I}'_{BC}$ на углы $\pm 30^\circ$

Суммируя попарно, находим векторы

$$OB' = \sqrt{3}\,(e^{-j30^\circ}\dot{I}'_{AC} + e^{j30^\circ}\dot{I}'_{BC}),$$

$$OC' = \sqrt{3}\,(e^{j30^\circ}\dot{I}'_{AC} + e^{-j30^\circ}\dot{I}'_{BC}).$$

Строим векторы $OB = -OB'$ и $OC = -OC'$.

Точки B и C — полюсы для определения векторов $\dot{b}$ и $\dot{c}$ соответственно. Для нахождения полюса вектора $\dot{a}$ необходимо соединить концы OB и OC. Середина этого отрезка и будет началом вектора $\dot{a}$. В правильности этого построения можно убедиться, определив разности векторов

$$AC = OC - OA = j\frac{\sqrt{3}}{2}\,(\dot{I}'_{BC} - \dot{I}'_{AC}),$$

$$BA = OA - OB = j\frac{\sqrt{3}}{2}(\dot{I}'_{BC} - \dot{I}'_{AC})$$

Векторы AC и BA равны по модулю и фазе. Следовательно, точка A — середина отрезка, соединяющего точки, B и C при любых фазах токов $\dot{I}'_{AC}$ и $\dot{I}'_{BC}$. Концом вектора a является средина отрезка, соединяющего векторы $\dot{I}_s$ и $\dot{I}_{2-s}$.

Для определения векторов $\dot{d}$ и $\dot{q}$ строим векторы

$$OD = -\sqrt{3}\,\dot{I}'_{AC}e^{-j30^\circ}.$$

и

$$OP = -\sqrt{3}\,\dot{I}'_{AC}e^{j30^\circ}.$$

Вектор $\dot{d}$ определяется как разность двух векторов, а именно:

$$\dot{d} = \dot{I}_s - OD. \qquad (281)$$

При неизменной емкости вектор OD постоянный для всех значений скольжения и разность двух векторов может быть найдена графически как геометрическое место точек концов вектора $\dot{I}_s$ относительно полюса D Конец вектора $\dot{d}$ направлен к вектору $\dot{I}_s$.

Вектор $\dot{q}$ определяется разностью

$$\dot{q} = \dot{I}_{2-s} - OP. \qquad (282)$$

Конец вектора $\dot{q}$ направлен к вектору $\dot{I}_{2-s}$. Полюсом для определения вектора $\dot{q}$ является точка P.

С помощью круговой диаграммы можно также определять проводимости y_{AC} и y_{BC}, при которых получается уравновешенный режим. Для этого проведем линию on, являющуюся продолжением тока $\dot{I}'_{AC}$, повернутого на угол $+30^\circ$. Из конца вектора $\dot{I}_s$, соответствующего скольжению s, под углом -30° к вектору $\dot{I}'_{BC}$, проводим прямую до пересечения с линией on.

Тогда имеем (см. далее рис. 50)

$$CP = \sqrt{3}\,\dot{I}'_{BC} = \sqrt{3}\,U_{н.ф}y_{BC},$$

$$OP = \sqrt{3}\,\dot{I}'_{AC} = \sqrt{3}\,U_{н.ф}y_{AC}.$$

При построении диаграммы, приведенной на рис. 50, выбирался наиболее удобный масштаб. Если, например, масштаб токов $m_a = 0{,}025$ *а/мм*, номинальное фазное напряжение $U_{н.ф} = 220$ *в*, число пар полюсов $p = 2$, число фаз $m_1 = 3$, то масштаб моментов двигателя

$$m_\mu = \frac{m_1 U_{н.ф}\cdot p\cdot m_a}{2\pi f\cdot 9{,}81} = \frac{3\cdot 220\cdot 2\cdot 0{,}025}{314\cdot 9{,}81} = 0{,}0107 \textit{ кгм/мм}$$

Пусковые и рабочие характеристики ОКД при включении обмоток статора в звезду

Схема ОКД при соединении обмоток статора в звезду с использованием индуктивного и емкостного сопротивлений экспериментально исследовалась на двигателе типа АОЛ31-4М мощностью 0,6 *квт* ($\dot{I}_н = 1,6$ *а*, $\cos\varphi_н = 0,76$, $\eta = 0,74$, 1410 об/мин).

Характеристики двигателя в однофазном режиме при рабочей индуктивности $x_L = 618$ *ом* и при емкостях $C = 15,9$ *мкф* и $C = 68$ *мкф* представлены на рис. 51, 52, 53.

На рис. 51 и 53 приведены зависимости токов и напряжений фаз, напряжений на дросселе и конденсаторах, а также

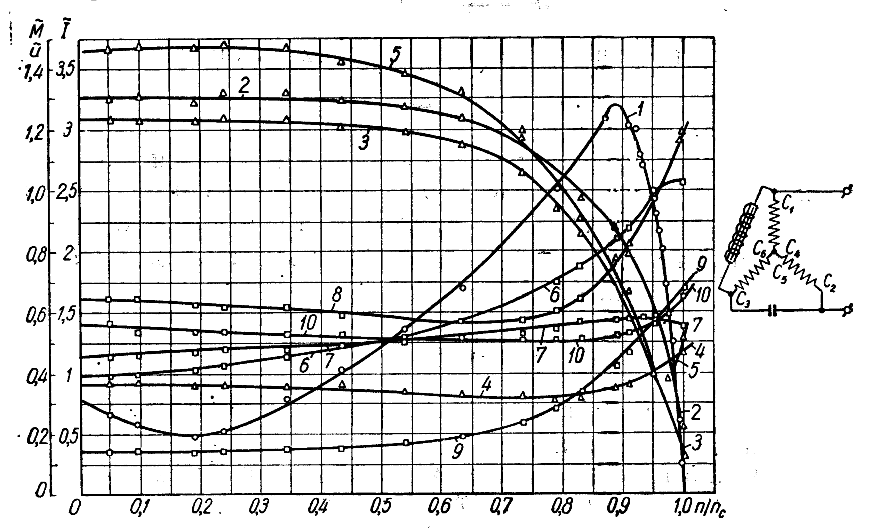


Рис. 51. Характеристики двигателя АОЛ 31-4 М в однофазном режиме при соединении обмоток в звезду:

$x_L = 618$ *ом*, $C = 15,9$ *мкф*, $U_н = 380$ *в*, $P_н = 0,6$ *квт*, $I_н = 1,6$ *а*, $M_н = 0,415$ *кгм*, $n_c = 1500$ об/мин.

момента двигателя от скорости вращения ротора при рабочей и пусковой емкостях.

В номинальном режиме двигателя проводимость фазы

$$y_1 = \frac{I_н}{U_н} = \frac{1,6}{220} = 0,00727 \ 1/ом.$$

Относительное значение индуктивной проводимости

$$\bar{b}_{BC} = \frac{\cos\varphi_1}{\sqrt{3}} - \frac{\sin\varphi_1}{3} = \frac{0,76}{\sqrt{3}} - \frac{0,65}{3} = 0,222.$$

Относительное значение емкостной проводимости

$$\bar{b}_{AC} = \frac{\cos\varphi_1}{\sqrt{3}} + \frac{\sin\varphi_1}{3} = \frac{0,76}{\sqrt{3}} + \frac{0,65}{3} = 0,654.$$

Индуктивная проводимость $b_{BC} = 0,222 \cdot 0,00727 = 0,00161$ $1/ом$. Сопротивление дросселя $x_L = \frac{1}{0,00161} = 620$ *ом*. Емкостная проводимость $b_{AC} = 0,654 \cdot 0,00727 = 0,00475$ $1/ом$. Рабочая емкость $C = \frac{b_{AC}}{\omega} = \frac{0,00475}{314} \cdot 10^6 = 15,1$ *мкф*.

Таким образом, принятая при опытах емкость несколько превышает требуемую по условию уравновешенного режима при номинальной нагрузке.

Как показывают данные опыта (см. рис. 52), двигатель в рабочем режиме при $x_L = 618$ *ом*, $C = 15,9$ *мкф* токах фаз, рав-

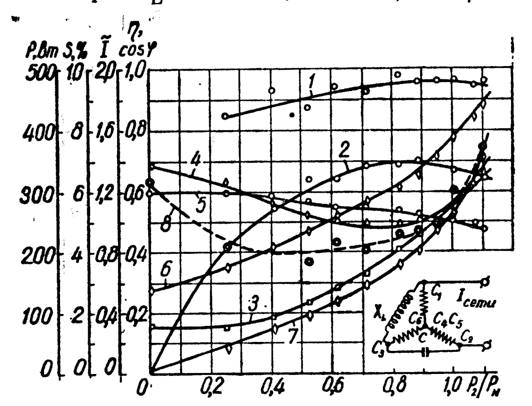


Рис. 52. Рабочие характеристики двигателя АОЛ 31-4М при включении обмоток в звезду:

($C=15,9$ *мкф*, $x_L=618$ *ом*, $U_н=380$ *в*, $I_н=1,6$ *а*, $P_н=0,6$ *квт*, $M_н=0,415$ *кгм*, $n_c=1500$ *об/мин*):

1—$\cos\varphi$; *2*—η; *3*—$\bar{I}_{C_1C_4}$, *4*—$\bar{I}_{C_2C_5}$; *5*—$\bar{I}_{C_3C_6}$; *6*—$\bar{I}_{сети}$; *7*—s; *8*—Δp.

ных номинальным, развивает полезную мощность P_2, равную 0,95 номинальной. При этом к.п.д. составляет 69%, коэффициент мощности $\cos\varphi=0,96$, скольжение $s=4,7\%$.

Номинальные потери двигателя в трехфазном режиме $\Delta p = 600\left(\frac{1}{0,74} - 1\right) = 210$ *вт*. В однофазном режиме при токах фаз, равных номинальным, общие потери, включая потери в конденсаторах и дросселе — 250 *вт*. Потери же в дросселе при 380 *в* — 22,5 *вт*. Фазовый угол дросселя $\varphi_{BC}=84°30'$. При выбранных значениях параметров уравновешенный режим не обеспечивается, что и приводит к некоторому уменьшению мощности двигателя.

При уменьшении нагрузки и неизменных значениях емкости и индуктивности ток в фазе A (C_2C_5), шунтированный конденсаторами, увеличивается до 1,37 номинального. Ток в фазе

C (C_3C_6), присоединяемой к точке между индуктивностью и емкостью, с уменьшением нагрузки увеличивается.

Если $P_2 = 0$, то $I_{C_3C_6} = 1{,}18\ I_н$.

При рабочих значениях индуктивности и емкости максимальный момент двигателя АОЛ 31-4М на 27% больше номинального. Пусковой момент равен 0,32 $M_н$. Минимальный момент несколько меньше пускового и составляет 0,2 номинального.

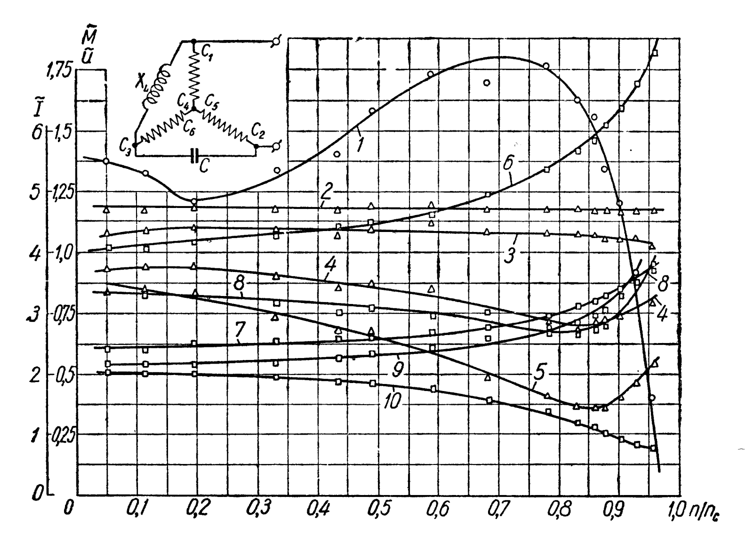


Рис. 53. Характеристики двигателя АОЛ 31-4М в однофазном режиме при соединении обмоток в звезду.

(x_L=618 *ом*, C=68 *мкф*, $U_н$=380 *в*, $I_н$=1,6 *а*, $P_н$=0,6 *квт*, $M_н$=0,415 *кгм*, $n_с$=1500 об/мин): 1—$\bar{M}$; 2—$\bar{I}_{C_1C_4}$; 3—$\bar{I}_{C_3C_6}$; 4—$\bar{I}_{C_2C_5}$; 5—$\bar{U}_{C_1C_3}$; 6—$\bar{U}_{C_1C_4}$; 7—$\bar{U}_{C_2C_3}$; 8—$\bar{U}_{C_3C_6}$; 9—$\bar{U}_{C_2C_5}$.

При увеличении емкости до $C = 68$ *мкф* пусковой момент увеличивается до 0,4 Mн. Минимальный момент при этом составляет 88% пускового, что соответствует требованиям, предъявляемым к трехфазным двигателям. Максимальный момент при этом больше номинального в 1,8 раза.

При емкости С=68 *мкф* отношение пускового тока к номинальному равно 4,8 (рис. 53).

Как видно из рис. 51, напряжение на дросселе увеличивается пропорционально скорости. С понижением нагрузки на валу двигателя уменьшаются коэффициент мощности и проводимость фазы. Из соотношения (252) следует, что с понижением нагрузки на валу двигателя для получения наиболее выгодных условий работы однофазного двигателя без обратно вращающегося поля необходимо также уменьшать проводимости конденсаторной батареи и дросселя. Сопротивление дросселя с понижением нагрузки должно поэтому увеличиваться. Практиче-

ски, однако, индуктивность должна мало изменяться с увеличением напряжения.

Фазовый угол дросселя отличается от 90° ($\varphi_{BC}=84°30'$), так как в данном случае в качестве дросселя используется лабораторный автотрансформатор. В специально изготовленных дросселях потери малы и угол $\varphi_{BC}\approx 90°$. Угол потерь в таких дросселях составляет 1—2°.

При расчетах значений параметров y_{BC} для уравновешенного режима в некоторых случаях нужно учитывать потери в дросселе.

Однофазные двигатели с соединением обмоток статора в звезду часто используются без шунтирующего дросселя. Такой двигатель можно рассчитать по методике, изложенной ранее, с учетом равенства нулю проводимости y_{BC} ($y_{BC}=0$).

Используя одну рабочую емкость, можно получить уравновешенный режим только при $\cos\varphi=0{,}5$; при трехфазной работе и номинальной нагрузке для большинства двигателей $\cos\varphi>0{,}5$.

В случае работы в качестве однофазных при использовании только одной емкости такие двигатели работают в неуравновешенном режиме.

Если в схеме однофазного двигателя шунтирующая индуктивность не используется, то величина нагрузки и требуемая емкость должны быть уменьшены, в противном случае токи сети и фазы, включаемой последовательно с конденсаторами, были бы значительно больше номинального.

При уменьшении емкости не достигается равенство токов фаз номинальному. Двигатель при соединении обмоток в звезду и использовании одной емкости может развивать мощность, равную 70—85% мощности двигателя в трехфазном режиме.

На рис. 54 и 55 приведены характеристики двигателя А 42-6 в однофазном режиме при рабочей емкости. Следует отметить, что при холостом ходе ток в двух фазах больше номинального, что максимальный момент больше номинального (в однофазном режиме) примерно на 20—25%, что третьи пространственные гармоники не проявляются и не ухудшают пусковую характеристику двигателя.

Напряжение на конденсаторной батарее

В ОКД, использующих индуктивность и емкость, в уравновешенном режиме напряжение конденсаторной батареи равно напряжению сети $U_к = U$.

При изменении нагрузки и неизменных значениях индуктивности и емкости напряжение на конденсаторах зависит от скорости вращения. При повышении скорости вращения ротора напряжение конденсаторной батареи увеличивается. На холостом ходу двигателя при емкости и индуктивности, необходимых для уравновешенного режима при номинальной нагрузке, напряжение конденсаторной батареи $U_к\approx 1{,}2\ U$.

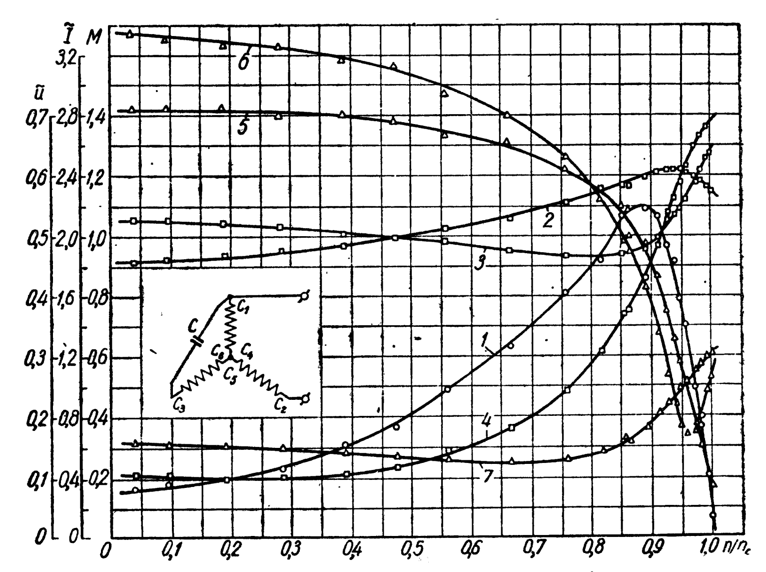


Рис. 54. Характеристики двигателя А 42-6 в однофазном режиме при соединении обмоток в звезду

($C = 40,7$ *мкф*, $U_н = 380$ *в*, $I_н = 4,3 a$, $P_н = 1,7$ *квт*, $M_н = 1,78$ *кгм*):

1—$\bar{M}$; *2*—$\bar{U}_{C_1C_4}$; *3*—$\bar{U}_{C_2C_5}$; *4*—$\bar{U}_{C_2C_6}$; *5*—$\bar{I}_{сети}$; *6*—$I_{C_2C_5}$; *7*—$\bar{I}_{C_3C_6}$.

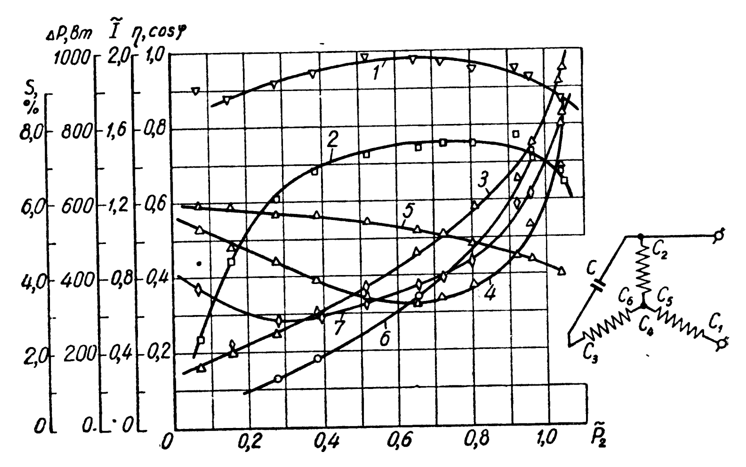


Рис. 55. Рабочие характеристики двигателя А 42-6 в однофазном режиме при соединении обмоток в звезду

($C = 40,7$ *мкф*, $U_н = 380$ *в*, $I_н = 4,3$ *а*, $P_н = 1,7$ *квт*, $M_н = 1,78$ *кгм*);

1—cos φ, *2*—η; *3*—$\bar{I}_{C_1C_4}$; *4*—$\bar{I}_{C_2C_5}$; *5*—$\bar{I}_{C_3C_6}$; *6*—s, *7*—Δp.

Время работы двигателя вхолостую не ограничено, поэтому конденсаторы должны длительно выдерживать это напряжение.

При напряжении сети $U = 220$ *в* номинальное напряжение конденсаторов $U_{к.н} = 260$ *в*, а при $U = 380$ *в* $U_{к.н} = 450$ *в*.

Напряжение на конденсаторах зависит также от величины емкости. Если включены пусковые конденсаторы (см. кривую *8*, рис. 53), напряжение на конденсаторах не превышает напряжения сети. Поэтому номинальное напряжение конденсаторов определяется по режиму холостого хода при рабочей емкости.

Глава VI

ОКД С ТРЕХФАЗНОЙ ОБМОТКОЙ СТАТОРА, СОЕДИНЕННОЙ В ТРЕУГОЛЬНИК

Трехфазные двигатели с напряжением 220/380 *в* наиболее рационально включать в однофазную сеть 220 *в* при соединении обмоток статора в треугольник. Симметричная трехфазная обмотка, соединенная в треугольник или звезду, не создает в кривой м. д. с. гармоник, кратных трем, вследствие этого широко распространенные двигатели с однослойной обмоткой не имеют паразитных моментов от третьей гармоники. Схема ОКД с трехфазной обмоткой статора, соединенной в звезду и треугольник, создает наиболее благоприятные механические характеристики и наилучшее использование мощности трехфазного двигателя в однофазном режиме.

Основные уравнения

Когда обмотка статора соединена в треугольник и фазы *B* и *C* шунтированы проводимостями

$$y_B = |y_B| e^{-j\varphi_B} = g_B - jb_B, \quad y_C = |y_C| e^{-j\varphi_C} = g_C - jb_C,$$

Рис. 56. Схема включения и обозначения ОКД с трехфазной обмоткой статора, соединенной в треугольник.

получаем такое уравнение включения двигателя (см. обозначения на рис. 56):

$$\dot{I}_B + \dot{I}y_B - \dot{I}_C - \dot{I}y_C = 0, \tag{283}$$

$$\dot{I} + \dot{I}_A - \dot{I}_B - \dot{I}y_B = 0, \tag{284}$$

$$\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C = 0, \tag{285}$$

$$\dot{U}_C = \frac{\dot{I}y_C}{y_C}, \tag{286}$$

$$\dot{U}_B = \frac{\dot{I}y_B}{y_B}, \tag{287}$$

$$\dot{U} = \dot{U}_A. \tag{288}$$

Раскладываем напряжения и токи фаз на составляющие нулевой, прямой и обратной последовательностей по уравнениям (1).

Из (285) следует, что токи и напряжения нулевой последовательности равны нулю

$$\dot{U}_0 = \dot{I}_0 = 0 \qquad (289)$$

Уравнения (283) — (288) после подстановки симметричных составляющих по (1) и при учете (289) приводят к таким уравнениям:

$$\dot{U} = \dot{U}_1 + \dot{U}_2,$$

$$0 = \dot{U}_1 [(a^2 - a) y_1 + a^2 y_B - a y_C] + \dot{U}_2[(a - a^2) y_2 + a y_B - a^2 y_C]. \qquad (290)$$

Отсюда при $U = U_{н.ф}$ можно найти комплексы относительных значений напряжений прямой и обратной последовательностей

$$\overline{U}_1 = \frac{y_2 + \dfrac{y_B}{1-a} + \dfrac{y_C}{1-a^2}}{y_1 + y_2 + y_B + y_C}, \qquad (291)$$

$$\overline{U}_2 = \frac{y_1 + \dfrac{y_B}{1-a^2} + \dfrac{y_C}{1-a}}{y_1 + y_2 + y_B + y_C}. \qquad (292)$$

Учитывая, что $1 - a^2 = \sqrt{3} e^{j30^\circ}$ и $1 - a = \sqrt{3} e^{-j30^\circ}$, и принимая, что

$$y_1 = |y_1| e^{-j\varphi_1} = g_1 - jb_1, \quad y_2 = |y_2| e^{-j\varphi_2},$$

$$y_B = |y_B| e^{-j\varphi_B} = g_B - jb_B, \quad y_C = |y_C| e^{-j\varphi_C} = g_C - jb_C,$$

находим относительные значения напряжений в таком виде (обозначения модулей опускаем):

$$\overline{U}_1 = \frac{y_2 e^{-j\varphi_2} + \dfrac{y_B}{\sqrt{3}} e^{-j(\varphi_B - 30^\circ)} + \dfrac{y_C}{\sqrt{3}} e^{-j(\varphi_C + 30^\circ)}}{y_1 e^{-j\varphi_1} + y_2 e^{-j\varphi_2} + y_B e^{-j\varphi_B} + y_C e^{-j\varphi_C}}, \qquad (293)$$

$$\overline{U}_2 = \frac{y_1 e^{-j\varphi_1} + \dfrac{y_B}{\sqrt{3}} e^{-j(\varphi_B + 30^\circ)} + \dfrac{y_C}{\sqrt{3}} e^{-j(\varphi_C - 30^\circ)}}{y_1 e^{-j\varphi_1} + y_2 e^{-j\varphi_2} + y_B e^{-j\varphi_B} + y_C e^{-j\varphi_C}}. \qquad (294)$$

Напряжения фаз B и C на основании уравнений (1) находим в таком виде:

$$U_B = \frac{a y_1 + a^2 y_2 - y_C}{y_1 + y_2 + y_B + y_C}, \qquad (295)$$

$$\overline{U}_C = \frac{a^2 y_1 + a y_2 - y_B}{y_1 + y_2 + y_B + y_C}. \tag{296}$$

Напряжение фазы A равно напряжению сети. Токи фаз A, B, C

$$\dot{I}_A = \dot{U}\,\frac{2y_1y_2 + y_B\left(\frac{y_1}{1-a} + \frac{y_2}{1-a^2}\right) + y_C\left(\frac{y_1}{1-a^2} + \frac{y_2}{1-a}\right)}{y_1 + y_2 + y_B + y_C}, \tag{297}$$

$$\dot{I}_B = \dot{U}\,\frac{-y_1y_2 + y_B\left(\frac{a^2y_1}{1-a} + \frac{ay_2}{1-a^2}\right) + y_C\left(\frac{a^2y_1}{1-a^2} + \frac{ay_2}{1-a}\right)}{y_1 + y_2 + y_B + y_C}, \tag{298}$$

$$\dot{I}_C = \dot{U}\,\frac{-y_1y_2 + y_B\left(\frac{ay_1}{1-a} + \frac{a^2y_2}{1-a^2}\right) + y_C\left(\frac{ay_1}{1-a^2} + \frac{a^2y_2}{1-a}\right)}{y_1 + y_2 + y_B + y_C}. \tag{299}$$

Ток сети находим из уравнения (284)

$$I = -\dot{U}\,\frac{(y_1 + y_2)(y_B + y_C) + 3y_1y_2 + y_By_C}{y_1 + y_2 + y_B + y_C}. \tag{300}$$

Уравновешенный режим

Рассматривая выражения для относительных значений напряжений прямой и обратной последовательностей ОКД с включением обмоток статора в звезду и в треугольник, находим, что соотношения (293) и (294) отличаются от (240 б) и (241 б) коэффициентом при внешних проводимостях. При соединении обмоток в звезду отношение внешней проводимости к проводимости фазы в три раза меньше, чем в случае соединения обмоток статора в треугольник.

На основании анализа схемы ОКД при включении обмоток в звезду можно принять, что при включении по схеме, показанной на рис. 56, однофазный двигатель вращается в направлении поля прямой последовательности при шунтировании фазы C емкостью (при $\varphi_C < 0$), а фазы B индуктивностью ($\varphi_B > 0$).

Для получения уравновешенного режима при заданных фазовых углах φ_C и φ_B значения модулей должны быть таковы:

$$\bar{y}_C = \frac{y_C}{y_1} = \sqrt{3}\,\frac{\sin(\varphi_1 - \varphi_B - 30^\circ)}{\sin(\varphi_B - \varphi_C + 60^\circ)}, \tag{301}$$

$$\bar{y}_B = \frac{y_B}{y_1} = \sqrt{3}\,\frac{\sin(\varphi_1 - \varphi_C + 30^\circ)}{\sin(\varphi_C - \varphi_B - 60^\circ)}. \tag{302}$$

Когда фаза B шунтирована индуктивностью без потерь ($\varphi_B = 90°$), а фаза C емкостью без потерь ($\varphi_C = -90°$), относительные значения проводимостей, при которых получается уравновешенный режим, определяются соотношениями

$$\bar{y}_C = \bar{b}_C = \frac{b_C}{y_1} = \sqrt{3}\,\frac{\sin(\varphi_1 - 90° - 30°)}{\sin(90° + 90° + 60°)} = \sin\varphi_1 + \sqrt{3}\cos\varphi_1, \quad (303)$$

$$\bar{y}_B = \bar{b}_B = \frac{b_B}{y_1} = \sqrt{3}\,\frac{\sin(\varphi_1 + 90° + 30°)}{\sin(-90° - 90° - 60°)} = \sqrt{3}\cos\varphi_1 - \sin\varphi_1. \quad (304)$$

На рис. 57 приведены кривые $\bar{y}_C$ и $\bar{y}_B$ в функции коэффициента мощности. Проводимость фазы двигателя при заданной скорости вращения ротора принята номинальной. При $\cos\varphi > 0{,}5$ фаза C шунтируется емкостью, а фаза B — индуктивностью. При $\cos\varphi = 0{,}5$ уравновешенный режим достигается путем использования одного реактивного сопротивления — емкости, шунтирующей фазу C. При $\cos\varphi < 0{,}5$ проводимость y_B имеет отрицательное значение, т. е. для получения уравновешенного режима фазы C и B шунтируются емкостями.

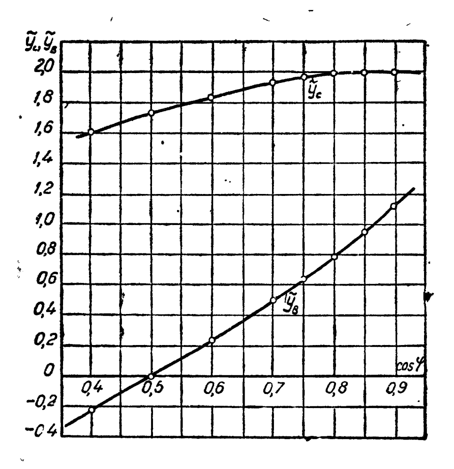


Рис. 57. Зависимость относительных значений шунтирующих реактивных проводимостей, при которых получается уравновешенный режим, от коэффициента мощности.

В уравновешенном режиме $U_2 = 0$ напряжение прямой последовательности

$$\bar{U}_1 = 1 \quad (\dot{U}_1 = \dot{U}), \quad (305)$$

напряжения фаз

$$\bar{U}_A = 1, \quad \bar{U}_B = a^2, \quad \bar{U}_C = a, \quad (306)$$

ток фаз

$$\dot{I}_A = \overset{*}{\dot{U}} y_1, \quad \dot{I}_B = a^2 \dot{U} y_1, \quad I_C = a\dot{U} y_1, \quad (307)$$

ток сети

$$\overset{*}{\dot{I}} = \dot{U}\,[(a^2 - 1)\,y_1 + a^2 y_B]. \quad (308)$$

Когда шунтирующие емкости реактивные и y_B определяется соотношением (304), ток сети можно найти из уравнения

$$\dot{I} = -\dot{U}\,|y_1|\,[3\cos\varphi_1 - j\sin\varphi_1].$$

В режиме двигателя активная мощность потребляется из сети и имеет положительный знак, поэтому, изменяя направление тока сети на схеме рис. 56, находим

$$\dot{I} = \dot{U} \mid y_1 \mid (3\cos\varphi_1 - j\sin\varphi_1) = U|y_1| \sqrt{9\cos^2\varphi_1 + \sin^2\varphi_1}\, e^{-j\psi}. \quad (309)$$

Угол ψ определяется по формуле

$$\operatorname{tg}\psi = \frac{1}{3}\operatorname{tg}\varphi_1. \quad (310)$$

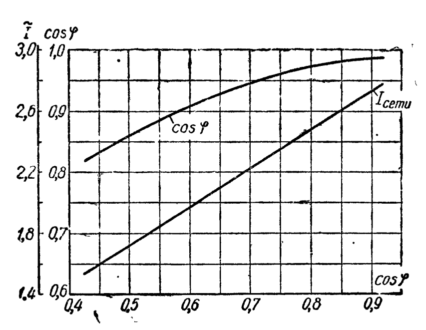


Рис. 58. Зависимость тока и коэффициента мощности сети в уравновешенном режиме от коэффициента мощности двигателя в трехфазном режиме.

Но $\dot{U} \mid y_1 \mid = I_{н.}$, следовательно отношение тока сети к номинальному току фазы

$$\bar{I} = \frac{I}{I_{н.ф}} = \sqrt{9\cos^2\varphi_1 + \sin^2\varphi_1} = \sqrt{8\cos^2\varphi_1 + 1}\,. \quad (311)$$

При включении обмотки двигателя в треугольник ток сети в $\sqrt{3}$ раз больше тока фазы. Как видно из рис. 58, если в трехфазном режиме коэффициент мощности больше 0,5, ток сети однофазного двигателя больше, чем трехфазного. При $\cos\varphi = 0{,}8$ ток сети однофазного двигателя больше тока сети трехфазного двигателя в $\frac{2{,}48}{1{,}73} = 1{,}43$ раза. Если коэффициент мощности двигателя в трехфазном режиме ниже 0,5, ток сети однофазного двигателя меньше, чем ток сети трехфазного двигателя. Коэффициент мощности однофазного двигателя отстающий, но он значительно больше, чем в трехфазном режиме.

В уравновешенном режиме конденсаторная батарея и дроссель находятся под номинальным фазным напряжением. Мощность дросселя и конденсаторной батареи могут быть опреде-

лены через активные реактивные составляющие проводимости

$$P_{\text{др}} = U^2 (g_B - jb_B),$$
$$P_{\text{к.р}} = U^2 (g_C + jb_C). \qquad (312)$$

Когда уравновешенный режим достигается при помощи чисто реактивных сопротивлений, определяемых соотношениями (303) и (304), реактивная мощность дросселя и конденсатора записывается в таком виде:

$$P_{\text{др}} = U^2 |y_1| (\sqrt{3} \cos \varphi_1 - \sin \varphi_1),$$
$$P_{\text{к.р}} = U^2 | y_1 | (\sqrt{3} \cos \varphi_1 + \sin \varphi_1). \qquad (313)$$

Так как полезная мощность двигателя в трехфазном режиме

$$P_{\text{н}} = 3U^2 | y_1 | \cos \varphi_1 \eta,$$

то мощность дросселя и конденсаторной батареи определяется такими же соотношениями, какие были получены для однофазных двигателей при соединении обмоток в звезду,

$$\overline{P}_{\text{др}} = \frac{P_{\text{др}}}{P_{\text{н}}} = \frac{1}{\eta}\left(\frac{1}{\sqrt{3}} - \frac{\operatorname{tg} \varphi_1}{3}\right),$$

$$\overline{P}_{\text{к.р}} = \frac{P_{\text{к.р}}}{P_{\text{н}}} = \frac{1}{\eta}\left(\frac{1}{\sqrt{3}} + \frac{\operatorname{tg} \varphi_1}{3}\right).$$

Сумма типовых мощностей конденсаторов и дросселя не зависит от коэффициента мощности двигателя

$$\overline{P}_{\text{доп}} = \overline{P}_{\text{др}} + \overline{P}_{\text{к.р}} = \frac{2}{\sqrt{3}\,\eta} = \frac{1{,}15}{\eta}. \qquad (314)$$

Для двигателя А41-4 при номинальном режиме $\eta = 0{,}815$, $\cos\varphi = 0{,}83$. Мощность конденсаторов в уравновешенном режиме $P_{\text{к.р}} = 0{,}983$, мощность дросселя $P_{\text{др}} = 0{,}434$. Сумма дополнительных мощностей $\overline{P}_{\text{доп}} = 1{,}42$. При к. п. д. $\eta = 0{,}7$ сумма реактивных мощностей повышается до 1,65.

Пусковой режим

Относительное значение пускового момента ОКД при включении обмоток статора в треугольник определяется соотношением, позволяющим рассчитать величину пускового момента при любых типах шунтирующих проводимостей,

$$\mu_{\text{п}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{y_{\text{к}} y_B \sin(\varphi_B - \varphi_{\text{к}}) + y_{\text{к}} y_C \sin(\varphi_{\text{к}} - \varphi_C) + y_B y_C \sin(\varphi_B - \varphi_C)}{4y_{\text{к}}^2 + y_B^2 + y_C^2 + 4y_{\text{к}} y_B \cos(\varphi_{\text{к}} - \varphi_B) + 4 y_{\text{к}} y_C \cos(\varphi_{\text{к}} - \varphi_C) + 2y_B y_C \cos(\varphi_B - \varphi_C)}. \qquad (315)$$

При выводе соотношения (315) принято, что проводимости y_B и y_C носят активно-индуктивный характер. В действительности фазы B и C шунтируются различными типами сопротивлений. При шунтировании фазы B индуктивностью (угол φ_B положительный) фаза C шунтируется емкостью (угол φ_C отрицательный).

Принимая за номинальную проводимость фазы при рабочем режиме и обозначая через $y_к = k_i y_н$ проводимость короткого замыкания фазы двигателя (где k_i — кратность пускового тока; $\bar{y}_B = \frac{y_B}{y_н}$ — относительное значение проводимости индуктивности; $\bar{y} = \frac{y_C}{y_н}$ — относительное значение проводимости индуктивности; $\bar{y}_C = \frac{y_C}{y_н}$ — относительное значение проводимости емкости), находим пусковой момент в таком виде:

$$\mu_п = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{k_i \bar{y}_B \sin(\varphi_B - \varphi_к) + k_i \bar{y}_C \sin(\varphi_к - \varphi_C) + \bar{y}_B \bar{y}_C \sin(\varphi_B - \varphi_C)}{4k_i^2 + \bar{y}_B^2 + \bar{y}_C^2 + 4k_i \bar{y}_B \cos(\varphi_к - \varphi_B) + 4k_i \bar{y}_C \cos(\varphi_к - \varphi_C) + 2\bar{y}_B \bar{y}_C \cos(\varphi_B - \varphi_C)}. \quad (315а)$$

При использовании для пуска емкостей и индуктивностей без потерь $\varphi_B = 90°$, $\varphi_C = -90°$ и пусковой момент

$$\mu_п = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{(\bar{y}_B + \bar{y}_C) k_i \cos\varphi_к}{4k_i^2 + (\bar{y}_B - \bar{y}_C)^2 + 4k_i (\bar{y}_B - \bar{y}_C) \sin\varphi_к}. \quad (316)$$

При $\bar{y}_B$ и $\bar{y}_C$, определяемых из условия получения уравновешенного режима ($\cos\varphi = 0{,}83$, $\bar{y}_B = 0{,}9$, $\bar{y}_C = 2$, см. рис. 57), пусковой момент двигателя невелик. Например, при $\cos\varphi_к = 0{,}5$, $k_i = 5$, $\bar{y}_B = 0{,}9$, $\bar{y}_C = 2$ по (316)

$$\mu_п = \frac{2 \cdot 5 \cdot 0{,}5\,(0{,}9 + 2)}{\sqrt{3} \cdot 4 \cdot 5^2 + (0{,}9 - 2)^2 + 4 \cdot 5 \cdot (0{,}9 - 2) \cdot 0{,}866} = 0{,}102.$$

Это составит до 15% номинального момента. Такое значение пускового момента приемлемо для приводов с разгоном вхолостую или с вентиляторным моментом сопротивления. Следует отметить, что в кривой моментов не имеется провалов от третьих пространственных гармоник.

Если ротор двигателя не имеет резко выраженного вытеснения тока в роторе, то пусковой и минимальный моменты примерно равны. В двигателях с вытеснением тока в роторе при рабочих значениях индуктивности и емкости минимальное значение вращающего момента меньше пускового. Поэтому не всегда возможен разгон двигателя даже вхолостую. При использовании

дополнительных пусковых проводимостей можно получить более высокие значения пускового момента.

Если отключить индуктивность, то пусковой момент уменьшится до $\mu_п = 0{,}0834$. При отключенной емкости пусковой момент значительно меньше, $\mu_п = 0{,}00224$. При изменении индуктивности (уменьшении индуктивности с помощью подмагничивания и др.) пусковой момент несколько увеличивается. Однако это увеличение незначительно.

Рассматривая $\mu_п$ как функцию $\bar{y}_B$, можно найти, что при $\bar{y}_B = 4{,}84$ пусковой момент достигает значения $\mu_п = 0{,}125$. Если индуктивное сопротивление уменьшить в $\frac{4{,}84}{0{,}9} = 5{,}37$ раза, то пусковой момент увеличивается на 2%. Следовательно, для повышения пускового момента нерационально изменять индуктивность.

Рассмотрим зависимость пускового момента при неизменном индуктивном сопротивлении и изменении сопротивления, шунтирующего фазу C. Когда все величины в (315 а) за исключением $\bar{y}_C$ являются постоянными, значение пускового момента можно записать в таком виде:

$$\mu_п = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{A_1 \bar{y}_C + B_1}{\bar{y}_C^2 + C_1 \bar{y}_C + D_1}. \qquad (317)$$

Постоянные A_1, B_1, C_1, D_1 в общем случае таковы:

$$A_1 = k_i \sin(\varphi_к - \varphi_C) + \bar{y}_B \sin(\varphi_B - \varphi_к),$$
$$B_1 = k_i \bar{y}_B \sin(\varphi_B - \varphi_к), \qquad (318)$$
$$C_1 = 4k_i \cos(\varphi_к - \varphi_C) + 2\bar{y}_B \cos(\varphi_B - \varphi_C),$$
$$D_1 = 4k_i^2 + \bar{y}_B^2 + 4k_i y_B \cos(\varphi_к - \varphi_B).$$

При

$$\bar{y}_{Cэ} = \frac{-B_1 \pm \sqrt{B_1^2 + A_1^2 D_1 - A_1 C_1 B_1}}{A_1}; \qquad (319)$$

пусковой момент достигает экстремума, определяемого соотношением

$$\mu_{п.э} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{A_1^2}{\pm 2\sqrt{B_1^2 + A_1^2 D_1 - A_1 B_1 C_1} + A_1 C_1 - 2B_1}. \qquad (320)$$

Как показывают расчеты, максимальное значение пускового момента получается, если перед корнем в (319) и (320) стоит плюс. Полученные соотношения отличаются от уравнений (263) и (264) для ОКД только значением коэффициентов при включении обмоток в звезду. Поэтому сделанные ранее выводы относительно зависимости максимума пускового момента и проводимости $y_{Cэ}$ от аргу-

мента φ_C остаются справедливыми и при соединении обмоток в треугольник.

При $\varphi_B = 90^\circ$ и $\varphi_C = -90^\circ$ максимальное значение пускового момента

$$\mu_{\text{п.э}} = \frac{1}{2\sqrt{3}} \cdot \frac{k_i \cos\varphi_{\text{к}}}{-k_i \sin\varphi_{\text{к}} - \bar{y}_B + \sqrt{k_i^2 + \bar{y}_B^2 + 2\bar{y}_B k_i \sin\varphi_{\text{к}}}}. \qquad (321)$$

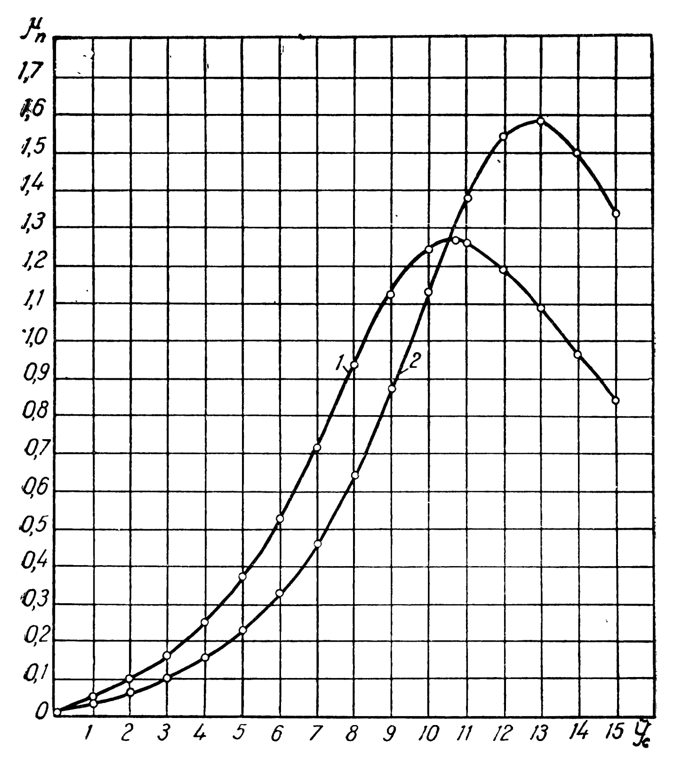


Рис. 59. Зависимость относительного значения пускового момента от величины емкости:
1—$\cos\varphi_{\text{к}}$=05, k_i=5, $\bar{y}_B$=0,9; 2—$\cos\varphi_{\text{к}}$=0,4, k_i=6, $\bar{y}_B$=0,9.

Емкость, при которой достигается максимальный момент, определяется соотношением

$$\bar{y}_{C\text{э}} = -\bar{y}_B + 2\sqrt{k_i^2 + \bar{y}_B^2 + 2\bar{y}_B k_i \sin\varphi_{\text{к}}}. \qquad (322)$$

В соотношениях (321) и (322) перед корнем ставится плюс. Для рассматриваемого примера $y_{C\text{э}} = 10{,}7$ и $\mu_{\text{п.э}} = 1{,}27$.

На рис. 59 показана зависимость относительного значения пускового момента двигателя от величины емкости при неизменной индуктивности ($\bar{y}_B = 0{,}9$) для двух значений коэффициента мощности при пуске и двух величин пускового тока. На рис. 59

видно, что пусковой момент ОКД при включении обмоток статора в треугольник может быть больше, чем при номинальном напряжении и трехфазном включении. При этом нужно, чтобы пусковая емкость была больше рабочей в пять-шесть раз. Важно выяснить, какое значение пускового момента может быть получено при использовании рабочей индуктивности, рабочей емкости и пускового сопротивления, шунтирующего на время пуска конденсаторы. При пренебрежении активными потерями в дросселе и наличии активной составляющей проводимости $y_c = g_c - jb_c$ значение пускового момента находим в таком виде:

$$\mu_п = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\bar{y}_B k_i \cos\varphi_к + \bar{y}_B \bar{g}_C + \bar{g}_C k_i \sin\varphi_к + \bar{b}_C k_i \cos\varphi_к}{(2k_i \cos\varphi_к + \bar{g}_C)^2 + (2k_i \sin\varphi_к - \bar{y}_B - \bar{b}_C)^2} \quad (323)$$

Здесь $\bar{g}_C = \frac{g_C}{y_н}$, $\bar{b}_C = \frac{b_C}{y_н}$.

На рис. 60 приведены результаты расчета по формуле (323) моментов в функции активной составляющей проводимости y_C

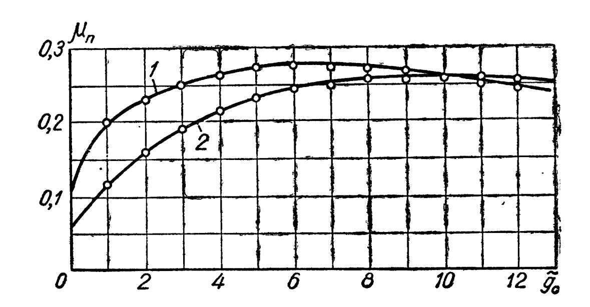


Рис. 60. Увеличение пускового момента ОКД при шунтировании рабочей емкости активным сопротивлением:

1—$\cos\varphi_к=0,5$, $к_i=5$; $\bar{y}_B=0,9$, $\bar{в}_C=2$; *2*—$\cos\varphi_к=0,4$, $к_i=6$, $\bar{y}_B=0,9$, $\bar{в}_C=2$.

для двух значений коэффициента мощности и кратности пускового тока. Максимальное значение пускового момента составляет 27% момента двигателя в трехфазном режиме. Активное сопротивление должно быть в три-четыре раза меньше номинального фазного. Применение активного пускового сопротивления, шунтирующего рабочую емкость, в некоторых случаях может оказаться целесообразным. После окончания разгона пусковое сопротивление должно быть отключено.

Результаты расчетов по приведенным выше соотношениям хорошо совпадают с данными опытов. Для двигателя *А* 41-4 мощностью 1,7 *квт*, $I_{н.ф} = 3,8$ *а*, $U_{н.ф} = 220$ *в*, $y_н = 0,0173$ *1/ом*,

$y_н = 0{,}88$. При пусковой емкости $C_п = 309{,}9$ *мкф*, $\bar{y}_C = \frac{314 \cdot 309{,}2 \cdot 10^{-6}}{0{,}0173} = 5{,}62$. В пусковом режиме для испытанного в данном опыте трехфазного двигателя

$$\frac{M_{п.н}}{M_н} = 1{,}25, \quad \cos\varphi_к = 0{,}53, \quad k_i = 4{,}12.$$

Отношение пускового момента двигателя в однофазном режиме к пусковому моменту в трехфазном режиме

$$\mu_н = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{4{,}12 \cdot 0{,}53\,(0{,}88 + 5{,}62)}{(2 \cdot 4{,}12 \cdot 0{,}53)^2 + (2 \cdot 4{,}12 \cdot 0{,}848 + 0{,}88 - 5{,}62)^2} = 0{,}676.$$

Отношение пускового момента однофазного двигателя к номинальному

$$\frac{M_п}{M_н} = \mu_п \frac{M_{п.н}}{M_н} = 0{,}676 \cdot 1{,}25 = 0{,}845.$$

Опытное значение $\frac{M_п}{M_н} = 0{,}84$.

Графо-аналитический способ расчета характеристик

Для однофазных двигателей с трехфазными обмотками статора, соединенными в треугольник, основные расчетные величины — относительные значения напряжений прямой и обратной последовательностей — определяются соотношениями (291) и (292).

Умножая числитель и знаменатель этих уравнений и вводя обозначения

$$\dot{I}_s = \dot{U}_{н.ф} y_1, \quad \dot{I}_{2-s} = \dot{U}_{н.ф}\, y_2, \quad \dot{I}'_B = \dot{U}_{н.ф} y_B, \quad \dot{I}'_C = \dot{U}_{н.\varphi} y_C, \tag{324}$$

находим соотношения

$$\overline{U}_1 = \frac{\dot{I}_{2-s} + \frac{1}{\sqrt{3}}\,(\dot{I}'_B e^{j30^\circ} + \dot{I}'_C e^{-j30^\circ})}{\dot{I}_s + \dot{I}_{2-s} + \dot{I}'_B + \dot{I}'_C} = \frac{\dot{b}}{2\dot{a}}, \tag{325}$$

$$\overline{U}_2 = \frac{\dot{I}_s + \frac{1}{\sqrt{3}}\,(\dot{I}'_B e^{-j30^\circ} + \dot{I}'_C e^{j30^\circ})}{\dot{I}_s + \dot{I}_{2-s} + \dot{I}'_B + \dot{I}_C} = \frac{\dot{c}}{2\dot{a}}. \tag{326}$$

Компексы $\dot{a}$, $\dot{b}$, $\dot{c}$ определяются соотношениями, которые удобно представить в виде разности двух векторов

$$\dot{a} = \frac{1}{2}\,(\dot{I}_s + \dot{I}_{2-s}) + \frac{1}{2}\,(\dot{I}'_B + \dot{I}'_C) = \dot{I}_п - OA, \tag{327}$$

$$\dot{b} = \dot{I}_{2-s} + \frac{1}{\sqrt{3}} (\dot{I}'_B e^{j30^\circ} + \dot{I}'_C e^{-j30^\circ}) = \dot{I}_{2=s} - OB, \qquad (328)$$

$$\dot{c} = \dot{I}_s + \frac{1}{\sqrt{3}} (\dot{I}'_B e^{-j30^\circ} + \dot{I}'_C e^{j30^\circ}) = \dot{I}_s - OC. \qquad (329)$$

При этом

$$\dot{I}_{п} = \frac{1}{2} (\dot{I}_s + \dot{I}_{2-s}), \qquad (330)$$

$$OA = -\frac{1}{2} (\dot{I}'_B + \dot{I}'_C), \qquad (331)$$

$$OB = -\frac{1}{\sqrt{3}} (\dot{I}'_B e^{j30^\circ} + \dot{I}'_C e^{-j30^\circ}), \qquad (332)$$

$$OC = -\frac{1}{\sqrt{3}} (\dot{I}'_B e^{-j30^\circ} + \dot{I}'_C e^{+j30^\circ}). \qquad (333)$$

Токи и напряжения фаз можно определить по соотношениям (276) и (277). Ток сети определим из уравнения для суммы токов в узле 1

$$\dot{I} = \dot{I}_C - \dot{I}_A + \dot{I}_{y_C} = \dot{I}_C - \dot{I}_A + \dot{U}_C y_C \qquad (334)$$

Раскладывая токи и напряжения фаз на симметричные составляющие и выполняя некоторые преобразования, находим значение тока сети в таком виде:

$$\dot{I} = -\sqrt{3}\left[\overline{U}_1 e^{-j30^\circ}\left(\dot{I}_s + \frac{\dot{I}'_C}{\sqrt{3}} e^{-j30^\circ}\right) + \overline{U}_2 e^{j30^\circ}\left(\dot{I}_{2-s} + \frac{\dot{I}'_C}{\sqrt{3}} e^{j30^\circ}\right)\right]. \qquad (335)$$

Изменяя направление вектора тока сети $I' = -I$ и вводя обозначения

$$\dot{d} = \dot{I}_s + \frac{\dot{I}'_C}{\sqrt{3}} e^{-j30^\circ} = \dot{I}_s - OD, \qquad (336)$$

$$\dot{q} = \dot{I}_{2-s} + \frac{\dot{I}'_C}{\sqrt{3}} e^{j30^\circ} = \dot{I}_{2-s} - OP, \qquad (337)$$

находим для тока сети такое значение:

$$I' = \sqrt{3}\,(\overline{U}_1 \dot{d} e^{-j30^\circ} + \overline{U}_2 \cdot \dot{q} e^{j30^\circ}). \qquad (338)$$

Графические построения для определения векторов $\dot{a}$, $\dot{в}$, $\dot{c}$, $\dot{d}$, $\dot{q}$ ОКД при соединении обмоток в треугольник такие же, как и при соединении обмоток в звезду (см. рис. 50). Отличие при построении полюсов *А, В, С, Д, Р* состоит в том, что при соединении в треугольник проводимости y_C и y_B в три раза больше проводимостей y_{AC} и y_{BC} соответственно. При использовании круговой

диаграммы для определения проводимостей y_C и y_B, при которых получается уравновешенный режим, выполняем построения, показанные на рис. 50. При этом получаем такие соотношения:

$$CP = \frac{1}{\sqrt{3}} \dot{I}_B = \frac{1}{\sqrt{3}} U_{н.ф} y_B,$$
$$OP = \frac{1}{\sqrt{3}} \dot{I}_C = \frac{1}{\sqrt{3}} U_{н.ф} y_C. \quad (339)$$

Для расчета механических характеристик можно воспользоваться значениями напряжений прямой и обратной последовательностей и моментов при скольжениях s и $2 - s$.

Графо-аналитический метод расчета может быть использован также для расчета характеристик двигателей с одним реактивным шунтирующим сопротивлением. Полюсы A, B, C, $Д$, P в этом случае определяются по приведенным ранее соотношениям с учетом равенства нулю одного из токов, например I_B.

Пусковые и рабочие характеристики ОКД при включении обмоток в треугольник

При соединении обмоток в треугольник номинальное напряжение сети и двигателя совпадают. В магнитном поле двигателя при работе в однофазной сети отсутствуют третьи пространственные гармоники, и пусковые характеристики значительно лучше, чем в двигателях с параллельно соединенными обмотками.

При использовании индуктивных и емкостных шунтирующих сопротивлений мощность однофазного двигателя в уравновешенном режиме равна номинальной мощности двигателя в трехфазном режиме. В схемах ОКД с включением обмоток в треугольник требуются конденсаторы одного номинального напряжения, а для пуска может быть использована пусковая емкость, отключаемая аппаратом с одним контактом.

В ОКД с включением обмоток статора в треугольник весьма интересны зависимости моментов, токов и напряжений фаз от скорости и величины сопротивлений, шунтирующих фазы B и C. Аналитические выражения этих величин так же, как и расчеты, громоздкие. Поэтому большое значение приобретают опытные данные.

Параметры дросселя и конденсаторов могут изменяться в широких пределах. Если индуктивность и емкость изменяются так, что при любой скорости вращения ротора удовлетворяются соотношения (301) и (302) и двигатель работает в уравновешенном режиме, то характеристики однофазного двигателя не будут отличаться от характеристик трехфазного двигателя.

В настоящее время широкое распространение получили маг-

нитные усилители, дроссели насыщения, индуктивность которых зависит от величины тока подмагничивания. Применение дросселей насыщения позволяет улучшить характеристики ОКД.

Для ОКД с параллельно включенными обмотками статора Н. Д. Торопцевым предложены [12, 85] схемы плавного регулирования емкости при помощи дросселей насыщения, которые включаются параллельно конденсаторам. Характеристики ОКД значительно улучшаются, а обслуживание становится таким же простым, как и трехфазных двигателей. Однако при существующих в настоящее время конденсаторах, электротехнической стали и выпрямителях плавное регулирование емкости не может быть широко распространено в двигателях мощностью выше 1 *квт* из-за значительного веса и стоимости дополнительных аппаратов.

Представляют значительный интерес зависимости моментов, токов и напряжений ОКД от скорости вращения ротора при значениях параметров дросселя и конденсаторов, определяемых пусковым и рабочим режимами.

При неподвижном роторе трехфазного двигателя коэффициент мощности близок к 0,5. Мощность дросселя, необходимая для получения уравновешенного режима при неподвижном роторе, невелика. Поэтому индуктивность дросселя в процессе разгона не изменяется. В ОКД с включением обмотки в треугольник используется рабочая индуктивность, рабочая и пусковая емкости.

На рис. 61 приведены характеристики двигателя А 41-4 в однофазном режиме при $x_L = 67{,}8$ *ом* и $C = 113{,}3$ *мкф*. Значения индуктивности и емкости выбраны из условия получения уравновешенного режима при номинальной скорости. Обмотка статора двигателя А 41-4 с диаметральным шагом, ротор короткозамкнутый, заливка алюминием, высота паза 10,6 *мм* при ширине 6,8 и 5,8 *мм*. Число пазов статора $Z_1 = 36$, ротора — $Z_2 = 26$, $2p = 2$. Имеется скос пазов ротора на одно зубцовое деление. Как видно из кривой *1* на рис. 61, пусковой момент (приводится отношение момента двигателя к номинальному моменту трехфазного двигателя) $\bar{M}_п = 0{,}17$. Минимальный момент $\bar{M}_{min} = 0{,}14$. В кривой моментов нет провалов от высших гармоник. Двигатель можно разгонять вхолостую. Максимальный момент двигателя при рабочих емкостях на 25% выше номинального. Ток сети, потребляемый двигателем при пуске с рабочей емкостью и индуктивностью, отнесенный к номинальному току фазы, составляет 6,1. Интересен также характер изменения напряжений фаз при изменении скорости. При разгоне двигателя напряжение фазы, шунтированной емкостью, увеличивается с 0,67 до 1,22 номинального фазного напряжения на холостом ходу. Напряжение фазы, шунтированной индуктивностью, увеличивается с 0,38 до 1,07 номинального фазного напряжения. Токи фаз при разгоне двигателя до номинальной скорости уменьшаются.

На холостом ходу ток и фазы, шунтированной конденсаторами, и фазы, включаемой на сеть непосредственно, увеличиваются.

На рис. 62 приведены рабочие характеристики двигателя А 41-4. В номинальном трехфазном режиме $\cos\varphi = 0{,}83$. В уравнове-

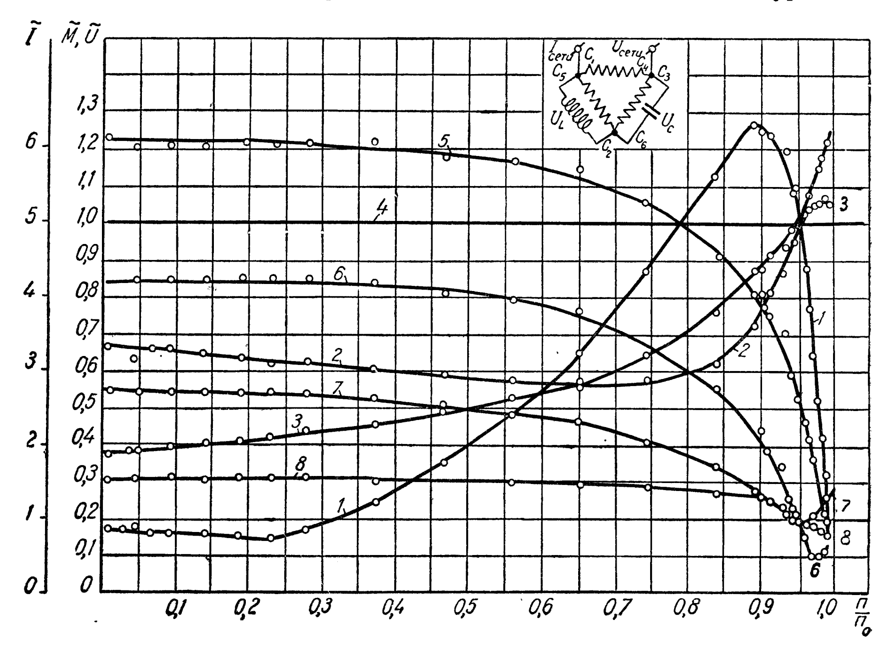


Рис. 61. Характеристики двигателя А 41-4 при $x_L = 67{,}8$ *ом*, $C = 113{,}3$ *мкф*, $P_н = 1{,}7$ *квт*, $U_н = 220$ *в*, $I_н = 3{,}8$ *а*, $M_н = 1{,}17$ *кгм*, $n_c = 1500$ об/мин: 1—$\bar M$; 2—$\bar U_{C_3C_6}$; 3—$\bar U_{C_2C_5}$; 4—$\bar U_{C_1C_4}$; 5—$I_{сети}$; 6—$\bar I_{C_1C_4}$; 7—$\bar I_{C_3C_6}$; 8—$\bar I_{C_2C_5}$.

шенном режиме однофазного двигателя коэффициент мощности должен быть $\cos\varphi = 0{,}975$, а $\bar I_{сети} = 2{,}55$. При полезной мощности $\bar P_н = \frac{P_2}{P_н} = 1$ имеем $\cos\varphi = 0{,}98$ и $\bar I_{сети} = 2{,}7$. При $\frac{P_2}{P_н} = 1$ токи фаз мало отличаются от номинального.

Когда фаза C_3C_6 шунтируется емкостью $C = 309{,}2$ *мкф*, которая только в 2,73 раза больше рабочей емкости, пусковой момент $\bar M_п = 0{,}84$, а пусковой ток $\bar I_{сети} = 6{,}5$ (рис. 63). Максимальный момент $\bar M_{max} = 2{,}03$. При увеличении скорости напряжения фаз, шунтированных индуктивностью и емкостью, резко увеличиваются вследствие резонанса напряжений. Полученные значения момента $\bar M_п = 0{,}84$ в отдельных случаях могут оказаться неприемлемыми. При повышени и пусковой емкости до $C = 550$ *мкф* ($C_п : C_р = 4{,}85 \approx k_i$), а пусковой момент однофазного дросселя будет равен пусковому моменту двигателя в трехфазном режиме $\frac{M_{п.т}}{M_н} = 1{,}7$

(по данным каталога) при пусковом токе $\overline{I}_{сети} = 9{,}5$. Ток сети при пуске трехфазного двигателя, включенного в треугольник, по данным каталога составляет $3 \cdot 6{,}5\ I_{н,ф} = 11{,}2 I_{н.ф}$.

В табл. 15 приводятся данные испытания двигателей А 41-4, А 41-6, МА 142-$^1/_8$. Приведенные опытные данные повторяются с небольшими отклонениями для двигателей серии А мощностью до 4,5 *квт*. Результаты испытаний показывают, что такие двига-

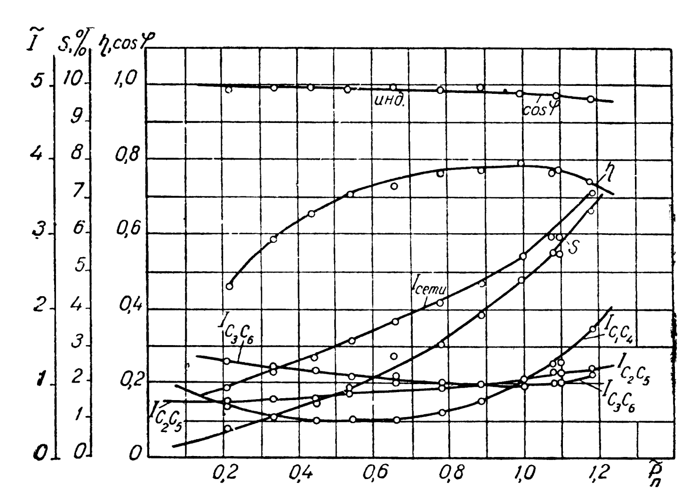


Рис. 62. Рабочие характеристики двигателя А 41-4 при $C=113{,}3$ *мкф*, $x_L=67{,}8$ *ом*, $U_н=220$ *в*, $P_н=1{,}7$ *квт*, $I_н=3{,}8$ *а*, $M_н=1{,}17$ *кгм*, $n_c=1500$ об/мин.

тели могут быть использованы в качестве ОКД при включении обмотки статора в треугольник без уменьшения номинальной мощности и что при использовании пусковых конденсаторов паразитные моменты от высших гармоник не препятствуют разгону двигателя даже при обмотках статора с диаметральным шагом.

Вытеснение тока в роторе не препятствует включению двигателя в качестве ОКД.

На рис. 64, 65, 66 приводятся результаты испытаний двигателя МА 142-$^1/_8$ в однофазном режиме. Двигатель МА 142-$^1/_8$ имеет однослойную диаметральную обмотку статора $Z_1=48$, $Z_2=60$, $2p=8$, ротор двухклеточный, залитый алюминием, пазы закрытые, скоса пазов нет.

Вытеснение тока в роторе приводит к тому, что при рабочей емкости пусковой момент значительно отличается от минимального (см. рис. 64). Однако при использовании пусковой емкости (см. рис. 66) кривая моментов значительно улучшается. При $\overline{M}_п=1{,}7$ минимальный вращающий момент составляет 1,37, что

Параметр	Тип двигателя				
	А 41-4				
	Симметричная работа	C=113,3 *мкф*, x_L=67,8 *ом*	C=309,2 *мкф*, x_L=67,8 *ом*	C=77,55 *мкф*	C=312 *мкф*
Напряжение сети, *в*	220/380	220	220	220	220
Номинальная мощность, *квт*	1,7	—	—	—	—
Номинальный ток, *а*	3,8	—	—	—	—
Коэффициент использования мощности габарита $P_2/P_н$	—	1	—	0,73	—
$I_{C_1C_4}$	—	1,00	—	1,0	—
$I_{C_2C_5}$	—	1,05	—	0,55	—
$I_{C_3C_6}$	—	0,995	—	1,0	—
К. п. д., %	81,5 (80)	78	—	78	—
cosφ	0,83	0,98	—	0,98	—
$M_{max}/M_н$	2,0	1,26	2,07	1,1	1,51
$M_п/M_н$	1,7 (1,25)	0,17	0,83	0,12	0,83
$M_{min}/M_н$	(1,2)	0,17	0,8	0,06	0,78
$I_п/I_н$	6,5 (4,0)	6,2	6,5	6,0	6,5
S, % } при P_2	5,33 (4,5)	4,8	—	3,35	—
$U_с/U_{сети}$, *в* } при P_2	—	1	1,22	0,95	—
$U_с/U_{сети}$, *в*, при P_2=0	—	1,22	1,22	1,15	0,9
Номинальные напряжения конденсаторов, *в*	—	265	265	265	265
Мощность конденсаторной батареи, *квар*	—	2,42	6,8	1,72	6,86
Мощность дросселя, *квар*	—	0,714	0,714	—	—
$M_н$, *кгм*	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17

удовлетворяет требованиям, предъявляемым трехфазным двигателям. Максимальный момент $\overline{M}_{max}$=2. В номинальном режиме трехфазного двигателя МА 142-$^1/_8$ cosφ=0,7. В однофазном режиме cos φ=0,94, $\overline{I}_{сети}$ =2,20 (см. рис. 65), что хорошо согласуется с расчетными данными (см. рис. 58) уравновешенного режима.

Как было установлено, при cosφ=0,5 шунтирующая индуктивность не нужна. Трехфазный двигатель может работать в уравновешенном режиме при использовании только конденсаторов. Однако и при более высоких коэффициентах мощности двигателей рассматриваемая схема эффективна, хотя мощность двигателя заметно понижается.

На рис. 67, 68, 69 приводятся характеристики моментов, то-

Таблица 15

и режим						
МА 142-1/8			А 41-6			
Симметричная работа	$C=204{,}2$ *мкф*, $x_L=60{,}5$ *ом*	$C=800$ *мкф*, $x_L=60{,}5$ *ом*	Симметричная работа	$C=79{,}5$ *мкф*, $x_L=143$ *ом*	$C=63{,}7$ *мкф*	$C=347$ *мкф*, $x_L=143$ *ом*
220/380	220	220	220/380	—	—	—
2,7	—	—	1,0	—	—	—
7,3	—	—	2,8	—	—	—
—	0,98	—	—	0,93	0,8	—
—	1,0	—	—	1,02	1,0	—
—	0,985	—	—	1,01	0,74	—
—	1,0	—	—	0,9	1,01	—
83	81	—	77	71	72	—
0,7	0,95	—	0,72	0,96	0,95	—
2,1	1,3	2	1,97	1,16	1,06	1,54
1,4	0,15	1,66	1,2	0,2	0,15	1,34
1,2	0,08	1,35	1,2	0,2	0,15	1,26
3,8	5,2	7,7	3,3	4,7	4,7	8,0
3,2	3,25	—	7	4,8	4,2	—
—	1,0	0,8	—	0,95	0,85	0,7
—	1,2	1,0	—	1,22	1,15	0,8
—	265	265	—	265	265	265
—	4,5	17,6	—	1,75	1,40	7,63
—	0,8	0,8	—	0,34	—	0,34
3,66	3,66	3,66	1,05	1,05	1,05	1,05

ков и напряжений фаз двигателя А 41-4 с высоким коэффициентом мощности $\cos\varphi=0{,}83$ при $C=77{,}6$ и 312 *мкф*. Мощность двигателя при этом понижается примерно на 20% по сравнению с номинальной (см. рис. 68). Однако пусковые характеристики (см. рис. 69) значительно лучше, чем при параллельном соединении обмоток статора.

Механические характеристики двигателей определялись по методу И. П. Боляева [75]. При скольжении меньше критического опыты проводились при рабочих емкостях и номинальном напряжении. Для скольжений больше критического напряжение сети уменьшалось до 120—150 *в*. Поэтому полученные нами значения кратностей пусковых токов и моментов (табл. 15, цифры в скобках) ниже, чем приведены в каталоге.

Напряжение конденсаторной батареи

При номинальной нагрузке ОКД, включении обмоток статора в треугольник и использовании индуктивности L и емкости C напряжение конденсаторной батареи равно номинальному

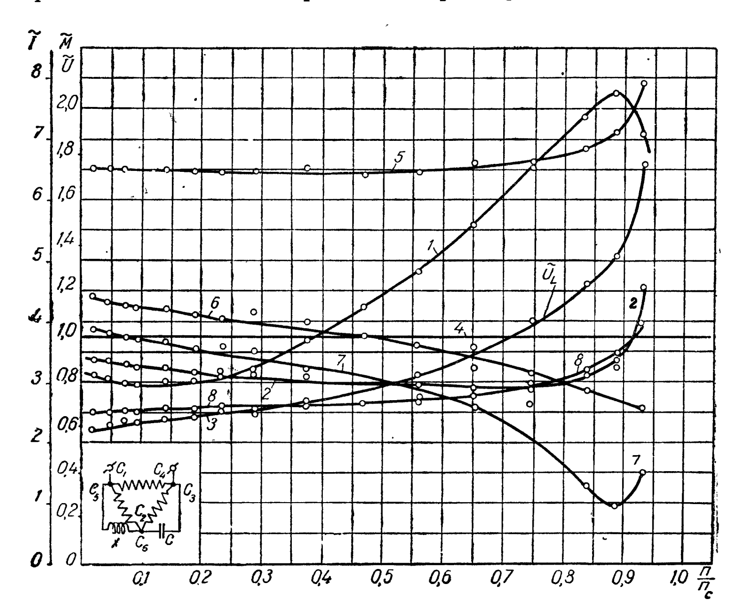


Рис. 63. Характеристики А 41-4 при $x_L=67,8$ *ом*, $C=309,2$ *мкф*, $P_н=1,7$ *квт*, $U_н=220$ *в*, $I_н=3,8$ *а*, $M_н=1,17$ *кгм*, $n_c=1500$ об/мин:

$1=\tilde{M}$; $2-\tilde{U}_{C_3C_6}$; $3-\tilde{U}_{C_2C_5}$; $4-\tilde{U}_{C_1C_4}$; $5-\tilde{I}_{сети}$; $6-\tilde{I}_{C_1C_4}$; $7-\tilde{I}_{C_3C_6}$; $8-\tilde{I}_{C_2C_5}$.

сетевому. При уменьшении нагрузки на валу двигателя напряжение конденсаторной батареи увеличивается. На холостом ходу оно примерно на 20% выше напряжения сети.

При пусковой емкости напряжение конденсаторной батареи с ростом скорости увеличивается. При малых скоростях напряжение конденсаторной батареи

$$U_к = (0,9 \div 1) U_{сети}.$$

При скоростях, близких к номинальным, напряжение конденсаторной батареи может увеличиваться вследствие возникающих резонансных явлений. В случае использования автоматических устройств для управления пуском отключение пусковой емкости происходит до появления резонансных явлений. Это предохраняет от резонансных перенапряжений конденсаторы.

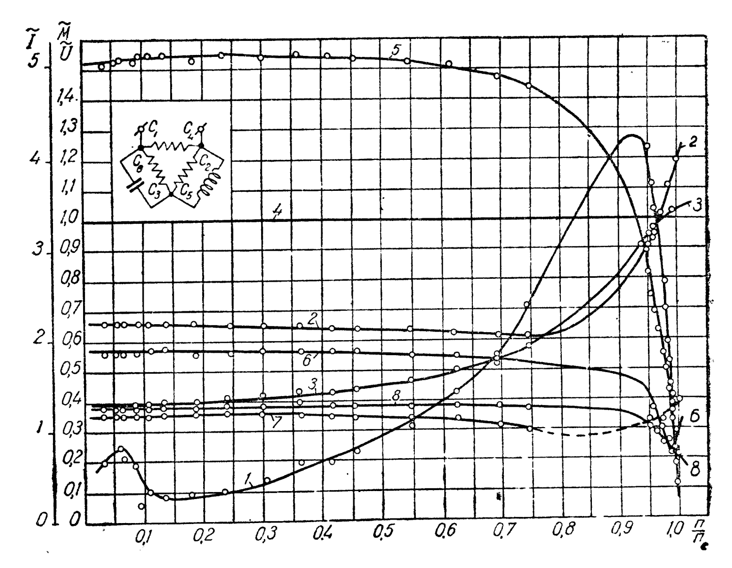


Рис. 64. Характеристики двигателя МА 142-1/8 при $x_L=60,5$ *ом*, $C=204,2$ *мкф*, $U_н=220$ *в*, $P_н=2,7$ *квт*, $I_н=7,3$ *а*, $M_н=3,66$ *кгм*, $n_с=750$ об/мин:
1—$\bar{M}$; *2*—$U_{C_3C_6}$; *3*—$\bar{U}_{C_2C_5}$; *4*—$\bar{U}_{C_1C_4}$; *5*—$\bar{I}_{сети}$; *6*—$I_{C_1C_4}$; *7*—$\bar{I}_{C_3C_6}$; *8*—$I_{C_2C_5}$.

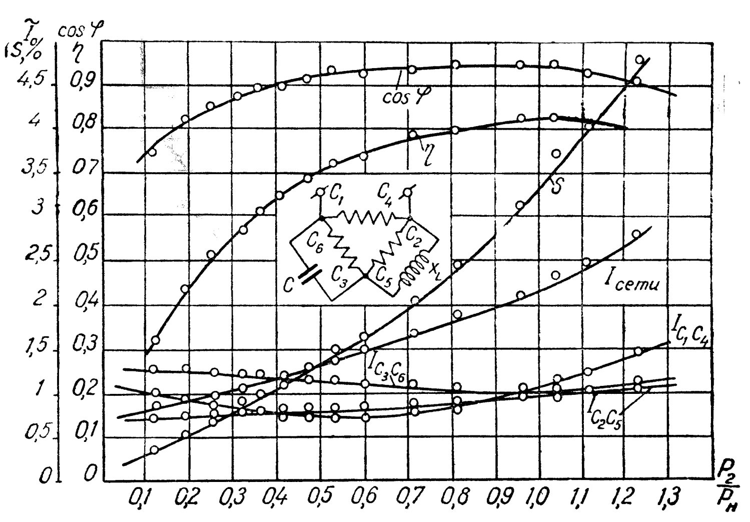


Рис. 65. Рабочие характеристики двигателя МА 142-1/8 при $x_L=60,5$ *ом*, $C=204,2$ *мкф*, $U_н=220$ *в*, $I_н=7,3$ *а*, $M_н=3,66$ *кгм*, $P_н=2,7$ *квт*, $n_с=750$ об/мин.

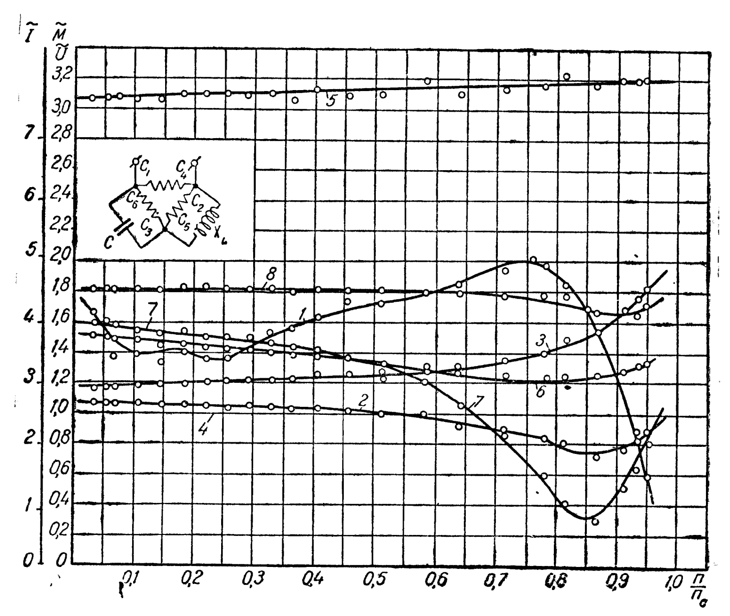


Рис. 66. Характеристика двигателя МА 142- 1/8 при $x_L=60{,}5$ *ом*, $C=800$ *мкф*, $U_н=220$ *в*, $I_н=7{,}3$ *а*, $P_н=2{,}7$ *квт*, $M_н=3{,}66$ *кгм*, $n_с=750$ об/мин;

1—$\bar M$; 2—$\bar U_{C_3C_6}$; 3—$\bar U_{C_2C_5}$; 4—$\bar U_{C_1C_4}$; 5—$\bar I_{сети}$; 6—$\bar I_{C_1C_4}$; 7—$\bar I_{C_3C_6}$; 8—$\bar I_{C_2C_5}$.

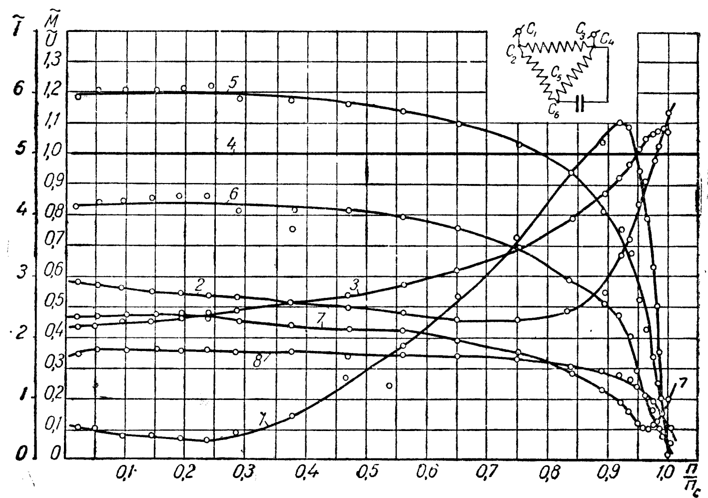


Рис. 67. Характеристика двигателя А 41-4 при $C=77{,}6$ *мкф*, $U_н=220$ *в*, $M_н=1{,}17$ *кгм*, $I_н=3{,}8$ *а*, $P_н=1{,}7$ *квт*:

1—$\bar M$; 2—$\bar U_{C_3C_6}$; 3—$\bar U_{C_2C_5}$; 4—$\bar U_{C_1C_4}$; 5—$\bar I_{сети}$; 6—$\bar I_{C_1C_4}$; 7—$\bar I_{C_3C_6}$; 8—$\bar I_{C_2C_5}$.

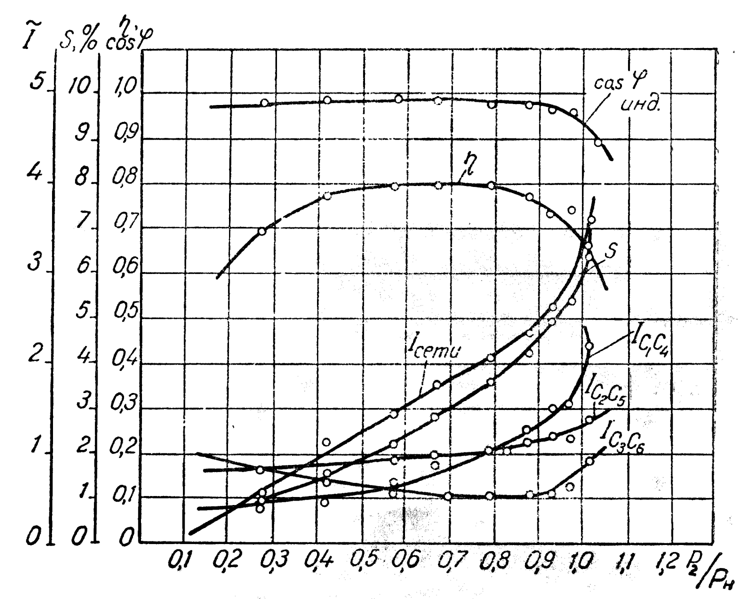


Рис. 68. Рабочие характеристики двигателя А 41-4 при $C=77{,}6$ *мкф*, $U_н=220$ *в*, $M_н=1{,}17$ *кгм*, $I_н=3{,}8$ *а*, $P_н=1{,}7$ *квт*.

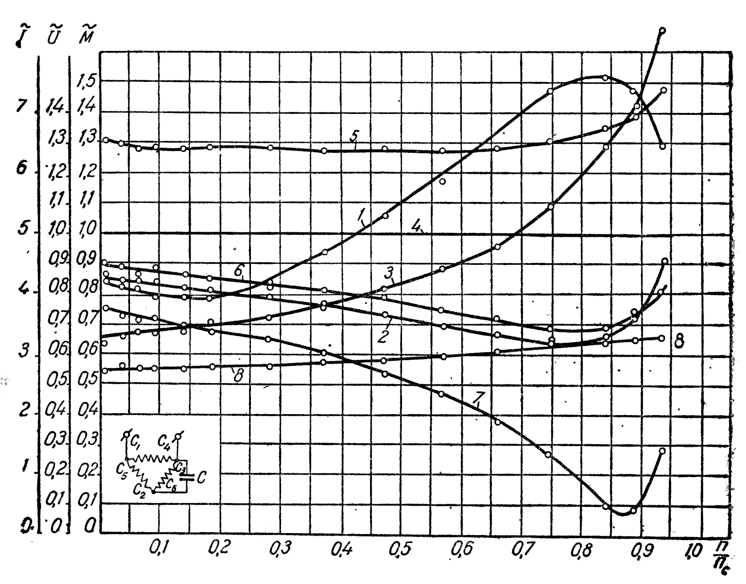


Рис. 69. Характеристики двигателя А 41-4 при $C=312$ *мкф*, $U_н=220$ *в*, $M_н=1{,}17$ *кгм*, $I_н=3{,}8$ *а*, $P_н=1{,}7$ *квт*, $n_c=1500$ об/мин; 1—$\overline{M}$; 2—$\overline{U}_{C_3C_6}$; 3—$\overline{U}_{C_2C_5}$; 4—$\overline{U}_{C_1C_4}$; 5—$\overline{I}_{сети}$; 6—$\overline{I}_{C_1C_4}$; 7—$\overline{I}_{C_3C_6}$; 8—$I_{C_2C_5}$.

Последние могут быть выбраны по напряжению холостого хода при рабочей емкости

$$U_к = 1{,}2U_{сети}.$$

В однофазных двигателях с включением обмоток статора в треугольник емкость присоединяется параллельно одной из фаз,

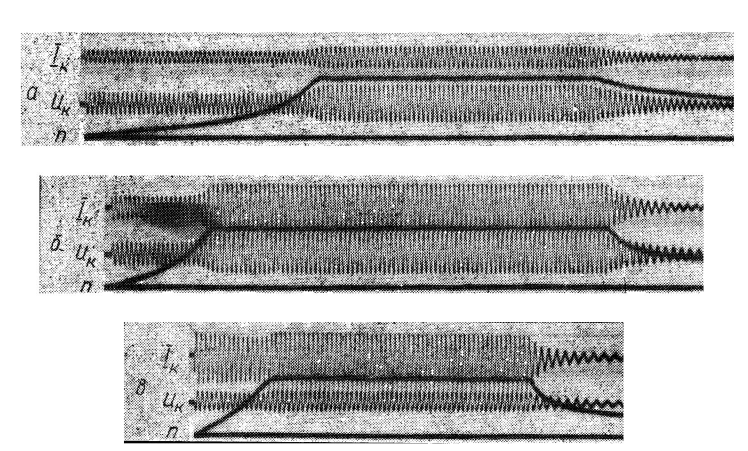


Рис. 70. Напряжение на конденсаторах при пуске и отключении двигателя АОЛ 31-4 М:
а—*C*=50 *мкф*; *б*—*C*=100 *мкф*; *в*—*C*=210 *мкф*.

поэтому при включении и выключении двигателя конденсаторы не подвергаются перенапряжению.

На рис. 70 приводятся осциллограммы пуска и отключения двигателя АОЛ 31-4М с обмотками, включенными в треугольник при различных рабочих емкостях. Сопротивление дросселя при этом равно $x_L = 200$ *ом*. При пуске напряжение конденсаторной батареи меньше напряжения холостого хода. Последнее увеличивается в $\frac{10{,}2}{8{,}2} = 1{,}25$ раза, если повысить емкость в два раза. При емкости $C_п = 210$ *мкф* напряжение конденсаторной батареи при холостом ходе составляет $\frac{5}{8{,}2} = 0{,}61$ напряжения при холостом ходе и рабочей емкости. Однако ни при включении, ни при выключении двигателя не возникает перенапряжения конденсаторной батареи. В этом еще одно преимущество схемы с трехфазной обмоткой статора, включаемой в треугольник, по сравнению со схемой с параллельным включением главной и вспомогательной обмоток. Для двигателей, рассчитанных на 220 *в*, напряжение конденсаторной батареи составляет примерно 265 *в*.

Расчет элементов схемы

Определим данные элементов схемы для двигателя А 41-4 (мощность 1,7 *квт*, $\dot{U}_{н.ф} = 220$ *в*, $I_{н.ф} = 3{,}8$ *а*, $\cos\varphi_н = 0{,}83$, $\eta_н = 81{,}5\%$).

Номинальная проводимость фазы

$$y_н = \frac{3{,}8}{220} \approx 0{,}0172 \frac{1}{ом},$$

$$\bar{y}_B = \frac{b_B}{y_н} = \sqrt{3}\cos\varphi - \sin\varphi = \sqrt{3}\cdot 0{,}83 - 0{,}558 = 0{,}88,$$

$$\bar{y}_C = \frac{b_C}{y_н} = \sqrt{3}\cos\varphi + \sin\varphi = \sqrt{3}\cdot 0{,}83 + 0{,}558 = 1{,}996.$$

Отсюда

$$b_B = 0{,}0152 \frac{1}{ом}; \quad x_B = 65{,}8 \ ом;$$

$$b_C = 0{,}0345 \frac{1}{ом}; \quad C = \frac{10^6 b_C}{\omega} = \frac{0{,}0345\cdot 10^6}{314} = 110 \ мкф$$

В уравновешенном режиме напряжения фаз равны номинальному (220 *в*). Номинальный ток дросселя

$$I_{н.др} = \frac{U_н}{x_B} = \frac{220}{65{,}8} = 3{,}34 \ a.$$

Мощность дросселя

$$P_{др} = U_н I_{н.др} = 220\cdot 3{,}3 = 735 \ ва.$$

Дроссель с требуемыми параметрами можно получить, используя железо Ш-35. Сечение стали принято $3{,}5 \times 4{,}67 = 16{,}3$ *см*², провод ПЭВ диаметром 1,56 *мм*. Число витков $w = 650$.

Воздушний зазор позволяет изменять величину индуктивности и составляет 1,5—2 *мм*. Вес дросселя 6,7 *кг*. Потери одного из образцов дросселя составят 37 *вт* при $U = 220$ *в*, $I = 3{,}25$ *а* $\cos\varphi = 0{,}0517$, $r = 3{,}5$ *ом*, $x_L = 67{,}8$ *ом* (рис. 71).

Для пусковой емкости, включаемой кратковременно, при использовании автоматического отключения могут быть приняты электролитические неполярные конденсаторы типа ЭП. Отключаемая пусковая емкость должна составлять приблизительно 440 *мкф*. Применение электролитических конденсаторов позволяет уменьшить стоимость конденсаторной батареи почти в восемь раз.

Рассмотрим еще один способ уменьшения стоимости пускового устройства. В схеме однофазного двигателя применяются

одновременно рабочая емкость и индуктивность. Для увеличения пускового момента необходимо уменьшить емкостное сопротивление в три-четыре раза, подключив дополнительную емкость. Уменьшить емкостное сопротивление можно также включением последовательно с емкостью индуктивного сопротивления.

Применим этот способ пуска ОКД для двигателя А 41-4. Емкостное рабочее сопротивление $x_{с.р} = 29,1$ *ом*, сопротивление пусковой емкости $x_{с.п} = \frac{29,1}{3} = 9,7$ *ом*.

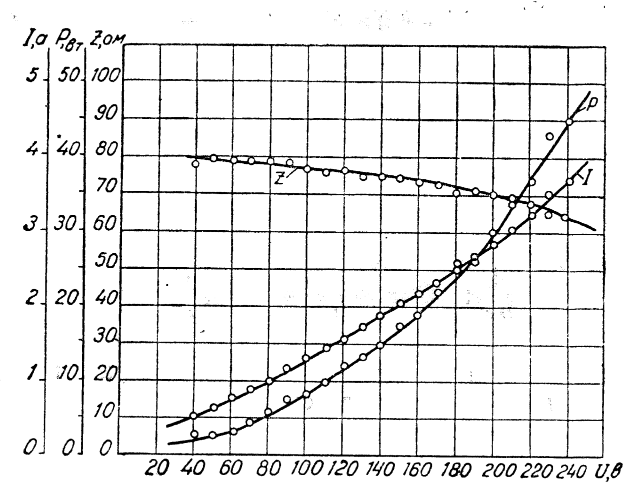


Рис. 71. Характеристики дросселя для двигателя А 41-4.

Сопротивление компенсирующей индуктивности

$$x_{др} = 29,1 - 9,7 = 19,4 \text{ ом}.$$

Опыты показывают, что напряжение конденсаторной фазы при включении пусковой емкости и неподвижном роторе

$$U_п = 0,9U_н = 0,9 \cdot 220 = 198 \text{ в}.$$

Ток, проходящий через емкость во время пуска

$$I_п = \frac{U_п}{x_{с.п}} = \frac{198}{9,7} = 20,4 \text{ а}.$$

Напряжение на конденсаторной батарее во время пуска

$$U_c = x_{с.р} I_п = 29,1 \cdot 20,4 = 593 \text{ в},$$

напряжение в дросселе $U_{др} = x_{др} I_п = 19,4 \cdot 20,4 = 396$ *в*. Мощность дросселя $P_{др} = U_{др} I_{др} = 396 \cdot 20,4 = 8090$ *ва*.

Допуская аналогично электрическим машинам перегрузочную способность $k_i = 6$, находим, что номинальная мощность дросселя должна быть $P_{др} = 1,35$ *ква*, т. е. в 1,5 раза больше мощности рабочего дросселя.

При таком пуске номинальное напряжение конденсаторов $U_{н.к} = 1000$ *в*, для переключения дросселя требуется контактор с двумя нормально закрытыми и одним нормально открытым контактом. Это снижает экономическую эффективность и надежность такого пуска и ограничивает его использование.

Глава VII

ОКД С ДВУХФАЗНЫМИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО СОЕДИНЕННЫМИ ОБМОТКАМИ СТАТОРА, РАСПОЛОЖЕННЫМИ ПОД УГЛОМ 90°

ОКД при последовательном включении двух обмоток имеют некоторые преимущества. При включениях и отключениях двигателя на конденсаторах не возникают перенапряжения. Рабочие и пусковые характеристики более приемлемы, чем при параллельном включении обмоток. В однофазных двигателях с активным или индуктивным пусковым сопротивлением при последовательном включении обмоток можно при нормальной работе использовать вспомогательную фазу. Номинальные напряжения сети и двигателя находятся в соответствии.

Выпускаемые для сельского хозяйства однофазные масляные трансформаторы типа ОМС мощностью 3 и 5 *ква* имеют две вторичные обмотки с номинальным напряжением 220 *в*. При последовательном соединении их получаем напряжение 440 *в*.

Номинальное напряжение ОКД с последовательным включением обмоток равно 440 *в*, если фазное напряжение исходного трехфазного двигателя равно 220 *в*.

Однофазные двигатели с последовательным включением обмоток позволяют, таким образом, использовать для сельскохозяйственного электропривода наиболее распространенные трехфазные двигатели напряжением 220/380 *в*, а также существующие однофазные трансформаторы, обеспечивая одновременно более высокое напряжение распределительной сети.

Основные уравнения схемы с последовательным включением обмоток

Основные свойства ОКД с последовательным включением обмоток, полученного из трехфазного, могут быть изучены на основании метода симметричных координат для трех- или двухфазной системы.

Рассматривая двигатель как двухфазный и принимая, что фазные зоны обмоток могут изменяться, изучим ряд схем однофазных двигателей, пользуясь одними и теми же уравнениями. В связи с этим наиболее рационально воспользоваться методом двух координат.

Для схемы, приведенной на рис. 72, можно записать такие уравнения включения

$$\dot{U} = \dot{U}_d + \dot{U}_q, \quad \dot{I}_d = \dot{I}_q + \dot{I}_C. \tag{340}$$

Раскладывая напряжения и токи фаз на составляющие по уравнениям (12) и принимая, что $k = \frac{w_d k_{d1}}{w_q k_{q1}}$, находим уравнения ОКД с последовательно соединенными двухфазными обмотками статора в таком виде:

$$\dot{U} = \dot{I}_{q1}\left(Z_{q1} - \frac{Z_{d1}}{jk}\right) + \dot{I}_{q2}\left(Z_{q2} + \frac{Z_{d2}}{jk}\right), \tag{341}$$

$$0 = \dot{I}_{q1}\left(1 + \frac{1}{jk} + \frac{Z_{q1}}{Z_c}\right) + \dot{I}_{q_2}\left(1 - \frac{1}{jk} + \frac{Z_{q2}}{Z_c}\right).$$

Рис. 72. Схема включения и обозначения ОКД с двухфазными последовательно включенными обмотками.

Главный определитель этих уравнений

$$\Delta = \left(Z_{q1} - \frac{Z_{d1}}{jk}\right)\left(1 - \frac{1}{jk}\right) - \left(Z_{q2} + \frac{Z_{d2}}{jk}\right)\left(1 + \frac{1}{jk}\right) - \frac{Z_{d1}Z_{q2} + Z_{d2}Z_{q1}}{jkZ_c}. \tag{342}$$

Симметричные составляющие токов фаз определяются такими соотношениями:

$$\dot{I}_{q1} = \frac{\dot{U}}{\Delta}\left(1 + \frac{Z_{q2}}{Z_c} - \frac{1}{jk}\right), \tag{343}$$

$$\dot{I}_{q2} = \frac{\dot{U}}{\Delta}\left(-1 - \frac{Z_{q1}}{Z_c} - \frac{1}{jk}\right), \tag{344}$$

$$\dot{I}_{d1} = \frac{\dot{U}}{jk\Delta}\left(-1 - \frac{Z_{q2}}{Z_c} + \frac{1}{jk}\right), \tag{345}$$

$$\dot{I}_{d2} = \frac{\dot{U}}{jk\Delta}\left(-1 - \frac{Z_{q1}}{Z_c} - \frac{1}{jk}\right). \tag{346}$$

Токи фаз d и q

$$\dot{I}_q = \frac{\dot{U}}{\Delta}\left(\frac{Z_{q2}}{Z_C} - \frac{Z_{q1}}{Z_c} - \frac{2}{jk}\right), \tag{347}$$

$$\dot{I}_d = \frac{\dot{U}}{jk\Delta}\left(-\frac{Z_{q2}}{Z_c} - \frac{Z_{q1}}{Z_c} - 2\right) \tag{348}$$

Ток в сопротивлении Z_c

$$\dot{I}_c = \frac{\dot{U}}{Z_c\Delta}\left[Z_{q1}\left(1 - \frac{1}{jk}\right) - Z_{q2}\left(1 + \frac{1}{jk}\right)\right]. \tag{349}$$

Напряжение конденсаторной батареи равно напряжению фазы q

$$\dot{U}_q = \dot{U}_c = \frac{\dot{U}}{\Delta}\left[Z_{q1}\left(1 - \frac{1}{jk}\right) - Z_{q2}\left(1 + \frac{1}{jk}\right)\right]. \tag{350}$$

Напряжения прямой и обратной последовательностей фаз d и q определяются соотношениями

$$\dot{U}_{q1} = \frac{\dot{U}}{\Delta}\left(Z_{q1} + \frac{Z_{q1}Z_{q2}}{Z_c} - \frac{Z_{q1}}{jk}\right), \tag{351}$$

$$\dot{U}_{q2} = \frac{\dot{U}}{\Delta}\left(-Z_{q2} - \frac{Z_{q1}Z_{q2}}{Z_c} - \frac{Z_{q2}}{jk}\right), \tag{352}$$

$$\dot{U}_{d1} = \frac{\dot{U}}{jk\Delta}\left[-Z_{d1}\left(1 - \frac{1}{jk}\right) - \frac{Z_{d1}Z_{q2}}{Z_c}\right]. \tag{353}$$

$$\dot{U}_{d2} = \frac{\dot{U}}{jk\Delta}\left[-Z_{d2}\left(1 + \frac{1}{jk}\right) - \frac{Z_{d2}Z_{q1}}{Z_c}\right]. \tag{354}$$

Напряжение фазы d

$$\dot{U}_d = \frac{\dot{U}}{jk\Delta}\left[-Z_{d1}\left(1 - \frac{1}{jk}\right) - Z_{d2}\left(1 + \frac{1}{jk}\right) - \frac{Z_{d1}Z_{q2}}{Z_c} - \frac{Z_{d2}Z_{q1}}{Z_c}\right]. \tag{355}$$

По приведенным соотношениям при известных параметрах фаз d и q могут быть найдены токи и напряжения фаз.

Пусковой режим. Выбор пусковой емкости

Вращающие моменты двигателя могут быть рассчитаны по симметричным составляющим токов и параметрам схемы замещения одной из фаз.

Так, моменты от прямого и обратного полей могут быть определены соотношениями

$$M_{пр} = M_{нs_{пр}} \left| \frac{\dot{U}_{q1}}{U_{qн}} \right|^2, \quad (356)$$

$$M_{об} = M_{нs_{об}} \left| \frac{\dot{U}_{q2}}{U_{qн}} \right|^2, \quad (357)$$

где $M_{нs_{пр}}$ и $M_{нs_{об}}$ — моменты двигателя при номинальном напряжении фазы q, круговом вращающемся поле и вращении ротора двигателя со скольжениями $s_{пр}$ и $s_{об}$.

При известных параметрах схемы замещения номинальные моменты определяются соотношениями

$$M_{нs_{пр}} = \frac{m_1 p}{2\pi f} \left| \frac{U_{qн}}{Z_{q1}} \right|^2 \frac{x_{mq}^2 \frac{r'_{2q}}{s_{пр}}}{\left(\frac{r'_{2q}}{s_{пр}} \right)^2 + (x'_{2q} + x_{mq})^2}, \quad (358)$$

$$M_{нs_{об}} = \frac{m_1 p}{2\pi f} \left| \frac{U_{qн}}{Z_{q2}} \right|^2 \frac{x_{mq}^2 \frac{r'_{2q}}{s_{об}}}{\left(\frac{r'_{2q}}{s_{об}} \right)^2 + (x'_{2q} + x_{mq})^2}. \quad (359)$$

Здесь x_{mq}, r'_{2q}, x'_{2q} — параметры схемы замещения обмотки q; $m_1 = 2$ — число фаз; p — число пар полюсов статора.

За номинальное для фазы q должно быть принято напряжение, при котором в воздушном зазоре возникает номинальное круговое магнитное поле.

В связи с тем, что обмотки d и q включены последовательно и задано напряжение сети, распределение напряжений между обмотками зависит от параметров обмоток, величины шунтирующего сопротивления Z_c, скорости. Если фазные зоны обмоток соизмеримы, заполнения пазов обмоток равны и сопротивления фаз искусственно не увеличиваются, то при размещении обмоток под углом 90° можно принять, что напряжения фаз d и q также будут смещены по фазе на угол 90°, а их отношение будет пропорционально эффективным числам витков.

Следовательно,

$$\frac{U_{dн}}{U_{qн}} = \frac{w_d k_{d1}}{w_q k_{q1}} = k, \quad (360)$$

$$U_{qн}^2 + U_{dн}^2 = U^2. \quad (361)$$

Отсюда находим значения напряжений фаз при круговом поле

$$U_{qн} = \frac{U}{\sqrt{1 + k^2}} \quad \text{и} \quad U_{dн} = \frac{kU}{\sqrt{1 + k^2}}. \quad (362)$$

Введя эти значения номинальных напряжений, найдем относительные значения напряжений прямой и обратной последовательностей фазы q

$$\overline{U}_{q1}=\frac{\dot{U}_{q1}}{U_{q\text{н}}}=\frac{\sqrt{1+k^2}}{\Delta}\left(Z_{q1}+\frac{Z_{q1}Z_{q2}}{Z_c}-\frac{Z_{q1}}{jk}\right), \qquad (363)$$

$$\overline{U}_{q2}=\frac{\dot{U}_{q2}}{U_{q\text{н}}}=\frac{\sqrt{1+k^2}}{\Delta}\left(-Z_{q2}-\frac{Z_{q1}Z_{q2}}{Z_c}-\frac{Z_{q2}}{jk}\right). \qquad (364)$$

Отношение пускового момента двигателя в однофазном режиме к пусковому моменту двигателя при симметричном включении определяется как разность квадратов модулей относительных значений напряжений прямой и обратной последовательностей

$$\mu_{\text{п}}=|\overline{U}_{q1}|^2-|\overline{U}_{q2}|^2=(1+k^2)\left|\frac{Z_{q\text{к}}}{\Delta}\right|^2\left\{\left|1-\frac{1}{jk}+\frac{Z_{q\text{к}}}{Z_c}\right|^2-\right.$$

$$\left.-\left|1+\frac{1}{jk}+\frac{Z_{q\text{к}}}{Z_c}\right|^2\right\}. \qquad (365)$$

При $s=1$ квадрат модуля главного детерминанта имеет значение

$$|\Delta|^2=\frac{4}{k^2}\left|Z_{d\text{к}}+Z_{q\text{к}}+\frac{Z_{d\text{к}}Z_{q\text{к}}}{Z_c}\right|^2. \qquad (366)$$

Подставляя (366) в (365), находим

$$\mu_{\text{п}}=\frac{k^2(1+k^2)\left\{\left|1-\frac{1}{jk}+\frac{Z_{q\text{к}}}{Z_c}\right|^2-\left|1+\frac{1}{jk}+\frac{Z_{q\text{к}}}{Z_c}\right|^2\right\}}{4\left|1+\frac{Z_{d\text{к}}}{Z_{q\text{к}}}+\frac{Z_{d\text{к}}}{Z_c}\right|^2}. \qquad (367)$$

Переходя к проводимостям и обозначая их через модули и аргументы

$$y_c=|y_c|e^{-j\varphi_c};\quad y_{d\text{к}}=|y_{d\text{к}}|e^{-j\varphi_{d\text{к}}};\quad y_{q\text{к}}=|y_{q\text{к}}|e^{-j\varphi_{q\text{к}}},$$

получим такое значение для пускового момента (обозначения модулей опускаем):

$$\mu_{\text{п}}=\frac{\left\{k^2(1+k^2)\left\{\left|1+\frac{j}{k}+\frac{y_c}{y_{q\text{к}}}e^{j(\varphi_{q\text{к}}-\varphi_c)}\right|^2-\left|1-\frac{j}{k}+\frac{y_c}{y_{q\text{к}}}e^{j(\varphi_{q\text{к}}-\varphi_c)}\right|^2\right\}\right\}}{4\left|1+\frac{y_{q\text{к}}}{y_{d\text{к}}}e^{j(\varphi_{d\text{к}}-\varphi_{q\text{к}})}+\frac{y_c}{y_{d\text{к}}}e^{j(\varphi_{d\text{к}}-\varphi_c)}\right|^2}. \qquad (368)$$

После преобразования

$$\mu_{\text{п}} = \frac{k(1+k^2)\dfrac{y_c}{y_{q\text{к}}}\sin(\varphi_{q\text{к}}-\varphi_c)}{1+\left(\dfrac{y_{q\text{к}}}{y_{d\text{к}}}\right)^2+\left(\dfrac{y_c}{y_{dk}}\right)^2+2\dfrac{y_{q\text{к}}}{y_{d\text{к}}}\cos(\varphi_{d\text{к}}-\varphi_{q\text{к}})+ +2\dfrac{y_c}{y_{d\text{к}}}\cos(\varphi_{d\text{к}}-\varphi_c)+2\dfrac{y_{q\text{к}}y_c}{y_{d\text{к}}^2}\cos(\varphi_c-\varphi_{q\text{к}})}. \quad (369)$$

Полученное соотношение показывает, что при шунтировании фазы q активным сопротивлением ($\varphi_c = 0$) или емкостью ($\varphi_c < 0$) пусковой момент положительный. При включении двигателя в сеть ротор будет вращаться в направлении поля прямой последовательности. В схемах замещения для токов прямой последовательности и в соотношении (358) для момента необходимо принимать $s_{\text{пр}} = s$. В схемах замещения для токов обратной последовательности и в соотношении (359) $s_{\text{об}} = 2 - s$. Когда $\varphi_c > 0$, знак пускового момента зависит от соотношения углов $\varphi_{q\text{к}}$ и φ_c. Пусковой момент можно выразить через относительное значение шунтирующей проводимости, которую удобно определить как отношение y_c к проводимости фазы q

$$\bar{y}_c = \frac{y_c}{y_{q\text{к}}}. \quad (370)$$

При этом

$$\mu_{\text{п}} = \frac{k(1+k^2)\,\bar{y}_c\sin(\varphi_{q\text{к}}-\varphi_c)}{\left[1+\left(\dfrac{y_{q\text{к}}}{y_{d\text{к}}}\right)^2+2\dfrac{y_{q\text{к}}}{y_{d\text{к}}}\cos(\varphi_{d\text{к}}-\varphi_{q\text{к}})\right]+ +\bar{y}_c\left[2\left(\dfrac{y_{q\text{к}}}{y_{d\text{к}}}\right)^2\cos(\varphi_c-\varphi_{q\text{к}})+ +2\dfrac{y_{q\text{к}}}{y_{d\text{к}}}\cos(\varphi_{d\text{к}}-\varphi_c)\right]+\bar{y}_c^2\left(\dfrac{y_{q\text{к}}}{y_{d\text{к}}}\right)^2}.$$

Обозначая

$$a_2 = k(1+k^2)\sin(\varphi_{q\text{к}}-\varphi_c),$$

$$b_2 = \left(\frac{y_{q\text{к}}}{y_{d\text{к}}}\right)^2, \quad (371)$$

$$c_2 = 2\left(\frac{y_{q\text{к}}}{y_{d\text{к}}}\right)^2\cos(\varphi_c-\varphi_{q\text{к}})+2\left(\frac{y_{q\text{к}}}{y_{d\text{к}}}\right)\cos(\varphi_{d\text{к}}-\varphi_c),$$

$$d_2 = 1 + \left(\frac{y_{q\text{к}}}{y_{d\text{к}}}\right)^2 + 2\frac{y_{q\text{к}}}{y_{d\text{к}}}\cos(\varphi_{d\text{к}} - \varphi_{q\text{к}}),$$

находим

$$\mu_\text{п} = \frac{a_2\bar{y}_c}{b_2\bar{y}_c^2 + c_2\bar{y}_c + d_2}. \quad (372)$$

Легко установить, что при

$$\bar{y}_{c\text{э}} = +\sqrt{\frac{d_2}{b_2}} = +\sqrt{1 + 2\frac{y_{d\text{к}}}{y_{q\text{к}}}\cos(\varphi_{d\text{к}} - \varphi_{q\text{к}}) + \left(\frac{y_{d\text{к}}}{y_{q\text{к}}}\right)^2} \quad (373)$$

значение пускового момента максимально

$$\mu_{\text{п}\max} = \frac{a_2}{c_2 + 2\sqrt{b_2d_2}} = \frac{k(1+k^2)\sin(\varphi_{q\text{к}} - \varphi_c)}{2\frac{y_{q\text{к}}}{y_{d\text{к}}}\left[\frac{y_{qk}}{y_{dk}}\cos(\varphi_c - \varphi_{q\text{к}}) + \cos(\varphi_{d\text{к}} - \varphi_c) + \right.}$$

$$\left. + \sqrt{1 + \left(\frac{y_{q\text{к}}}{y_{d\text{к}}}\right)^2 + 2\frac{y_{q\text{к}}}{y_{d\text{к}}}\cos(\varphi_{d\text{к}} - \varphi_{q\text{к}})}\right]. \quad (374)$$

Когда аркументы проводимостей фаз равны $(\varphi_{d\text{к}} = \varphi_{q\text{к}})$,

$$\mu_\text{п} = \frac{k(1+k^2)\bar{y}_c\sin(\varphi_{q\text{к}} - \varphi_c)}{\left(1 + \frac{y_{q\text{к}}}{y_{d\text{к}}}\right)^2 + 2\bar{y}_c\frac{y_{q\text{к}}}{y_{d\text{к}}}\cos(\varphi_c - \varphi_{q\text{к}})\left[\frac{y_{q\text{к}}}{y_{d\text{к}}} + 1\right] + \bar{y}_c^2\left(\frac{y_{q\text{к}}}{y_{d\text{к}}}\right)^2}, \quad (375)$$

$$\mu_{\text{п}\max} = \frac{k(1+k^2)\sin(\varphi_{q\text{к}} - \varphi_c)}{2\frac{y_{q\text{к}}}{y_{d\text{к}}}\left(1 + \frac{y_{q\text{к}}}{y_{d\text{к}}}\right)[1 + \cos(\varphi_c - \varphi_{q\text{к}})]}, \quad (376)$$

$$\bar{y}_{c\text{э}} = 1 + \frac{y_{d\text{к}}}{y_{q\text{к}}}. \quad (377)$$

Когда аргументы проводимостей фаз равны $(\varphi_{d\text{к}} = \varphi_{q\text{к}})$, а проводимости относятся как квадраты чисел витков обмоток

$$\frac{Z_{d\text{к}}}{Z_{q\text{к}}} = \frac{y_{q\text{к}}}{y_{d\text{к}}} = k^2,$$

то

$$\mu_\text{п} = \frac{k(1+k^2)\bar{y}_c\sin(\varphi_{q\text{к}} - \varphi_c)}{(1+k^2)^2 + 2\bar{y}_ck^2(1+k^2)\cos(\varphi_c - \varphi_{q\text{к}}) + k^4\bar{y}_c^2}, \quad (378)$$

$$\mu_{\text{п max}} = \frac{\sin(\varphi_{q\text{к}} - \varphi_c)}{2k\,[1 + \cos(\varphi_c - \varphi_{q\text{к}})]}, \tag{379}$$

$$\bar{y}_{c\text{э}} = 1 + \frac{1}{k^2}. \tag{380}$$

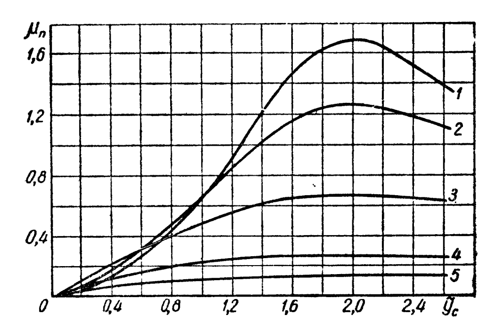


Рис. 73. Зависимость пускового момента ОКД с двухфазными симметричными последовательно соединенными обмотками от шунтирующей проводимости

$\cos \varphi_{\text{к}} = 0{,}54$: 1—$\varphi_c = -90°$ (емкость); 2—$\varphi_c = -80°$; 3—$\varphi_c = -50°$; 4—$\varphi_c = 0$; 5 — $\varphi_c = 90°$.

При симметричных обмотках $k = 1$,

$$\mu_{\text{п}} = \frac{2\bar{y}_c \sin(\varphi_{q\text{к}} - \varphi_c)}{4 + 4\bar{y}_c \cos(\varphi_c - \varphi_{q\text{к}}) + \bar{y}_c^2}, \tag{381}$$

$$\mu_{\text{п max}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sin(\varphi_{q\text{к}} - \varphi_c)}{1 + \cos(\varphi_c - \varphi_{q\text{к}})}, \tag{382}$$

$$\bar{y}_{c\text{э}} = 2. \tag{383}$$

Зависимость пускового момента от проводимости, шунтирующей фазу q, при $к=1$ представлена на рис. 73. При конденсаторном пуске величина максимального момента при $\cos\varphi_{\text{к}} = 0{,}54$ составляет 1,7. При увеличении активной составляющей шунтирующей проводимости максимальное значение пускового момента уменьшается. В области малых проводимостей ($\bar{y}_c = 0$ — 0,7), пусковой момент увеличивается при увеличении активной составляющей проводимости. Однако, когда угол потерь превышает аргумент проводимости фазы, пусковой момент уменьшается.

Сравнение пусковых характеристик ОКД при параллельном (см. рис. 11) и последовательном (см. рис. 73) соединении обмоток показывает, что величина пускового момента, который может быть получен, не зависит от схемы включения. При

последовательном включении обмоток для получения тех же пусковых моментов требуется в два раза бо́льшая емкость конденсаторов или проводимость, шунтирующая фазу q, чем при параллельном включении однофазного двигателя. Однако мощности пусковых конденсаторов при параллельном и последовательном включении одинаковы, так как напряжения на конденсаторах при параллельном включении обмоток примерно в $\sqrt{2}$ раза больше напряжения сети, а при последовательном соединении обмоток примерно в 2 раза меньше напряжения сети.

Поскольку для пуска используются электролитические конденсаторы, которые более экономичны при низком напряжении, применение последовательного соединения обмоток может дать некоторый выигрыш. Применение последовательного соединения обмоток дает возможность уменьшить число витков в фазе, и, следовательно, применить провод большего диаметра, что бывает выгодно в микродвигателях.

Рассмотрим зависимость пускового момента от емкости ОКД при $\kappa=\frac{1}{\sqrt{3}}$; $\lambda_d={}^1/_3$; $\lambda_q={}^2/_3$. Хотя при включении трехфазного двигателя на однофазную сеть емкость может шунтировать как одну $(\lambda_q={}^1/_3)$, так и две $(\lambda_q={}^2/_3)$ последовательно соединенные фазы, последний случай используется наиболее часто.

Если ротор короткозамкнутый, обмотка статора диаметральная, то, как было установлено ранее, сопротивление фаз может быть записано в таком виде:

$$Z_{q\text{к}} = 2Z_{\text{к}}\ ;\ Z_{d\text{к}} = \frac{1}{3}Z_0 + \frac{2}{3}Z_{\text{к}}\ ,$$

где $Z_{\text{к}}$ — сопротивление короткого замыкания фазы двигателя в трехфазном режиме. При этом можно принять, что $Z_0 = Z_{\text{к}}$.

Поэтому $Z_{d\text{к}} \approx Z_{\text{к}}$ и $\frac{Z_{d\text{к}}}{Z_{q\text{к}}} = \frac{y_{q\text{к}}}{y_{d\text{к}}} \approx \frac{1}{2}$. Аргументы фаз d и q примерно равны. Подставляя значения k и отношения параметров в (375) (376) и (377), находим

$$\mu_{\text{п}} = \frac{3{,}08\,\bar{y}_c \sin(\varphi_{\text{к}} - \varphi_c)}{9 + 6\,\bar{y}_c \cos(\varphi_c - \varphi_{\text{к}}) + \bar{y}_c^2}, \tag{384}$$

$$\mu_{\text{п}\max} = \frac{0{,}513 \sin(\varphi_{\text{к}} - \varphi_c)}{1 + \cos(\varphi_c - \varphi_{\text{к}})}, \tag{385}$$

$$\bar{y}_{c\text{э}} = 1 + 2 = 3. \tag{386}$$

На рис. 74 представлена зависимость пускового момента однофазного двигателя при конденсаторном пуске ($\lambda_d = 1/3$, $\lambda_q = 2/3$, $\frac{Z_{dk}}{Z_{qk}}=1/2$) для двух значений коэффициента мощности $\cos\varphi_{\text{к}}=0{,}54$ и $\cos\varphi_{\text{к}}=0{,}45$). Когда коэффициенты мощности равны, кривые

(см. рис. 73 и 74) отличаются только масштабом проводимости $\bar{y}_c$. Соотношение (385) показывает, что при использовании для пуска активного сопротивления максимальное значение пускового момента составляет около 0,3 пускового момента в симметричной работе. При использовании индуктивности для пуска максимальное значение момента равно примерно 0,15 пускового момента при симметричной работе.

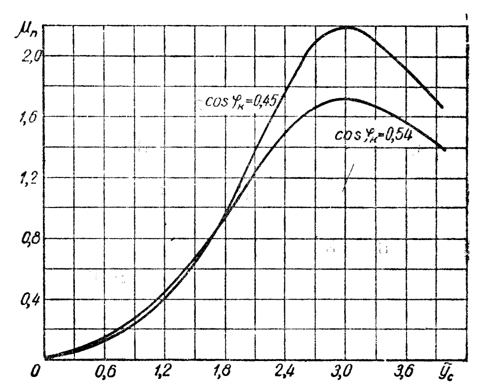


Рис. 74. Пусковой момент ОКД при конденсаторном пуске ($\lambda_d=1/3$, $\lambda_q=2/3$, $Z_{dк}=1/2 Z_{qк}$).

Когда токи фаз однофазного двигателя при номинальной скорости $I_d = I_q = I_{н.ф}$, мощность его составляет около 85% мощности двигателя в трехфазном режиме. Поэтому пусковой момент однофазного двигателя также может быть меньше, чем в трехфазном режиме, и составлять $\mu_п = 0{,}85$. Из рис. 74 находим, что шунтирующая емкость

$$\bar{y}_c = 1{,}7 - 1{,}8. \tag{387}$$

Выражая сопротивление фазы q при неподвижном роторе через параметры двигателя в трехфазном режиме, находим значение пусковой емкости в микрофарадах

$$C_п = \frac{0{,}9 k_i I_{н.ф} \cdot 10^6}{314 U_{н.ф}}. \tag{388}$$

Расчеты показывают, что приведенное соотношение дает удовлетворительные результаты. Например, для двигателя АОЛ 31-4М ($P=0{,}6$ *квт*, $U_{н.ф} = 220$ *в*, $I_{н.ф} = 1{,}6$ *а*, $k_i = 3{,}5$),

$$C_п = \frac{0{,}9 \cdot 3{,}5 \cdot 1{,}6 \cdot 10^6}{314 \cdot 220} = 73 \text{ мкф}.$$

Для двигателя АОС 51-4 ($P = 4{,}5$ *квт*, $U_{н.ф} = 220$ *в*, $I_{н.ф} = 10{,}4$ *а*, $k_i = 5$)

$$C_п = \frac{0{,}9 \cdot 5 \cdot 10{,}4 \cdot 10^6}{314 \cdot 220} = 676 \text{ мкф}.$$

Для двигателя АОС 51-4 $M_{max} = M_п$ и $\cos \varphi_к = 0{,}647$. Поэтому пусковая емкость меньше полученного значения и составляет $C_п = 570$ *мкф* при $\mu_п \approx 0{,}85$. Соотношение (388) удобно использо-

вать для расчета емкости в первом приближении и более точного расчета путем проб по соотношениям для пускового момента. Пусковой ток однофазного двигателя при последовательном соединении обмоток

$$I_{п} = \frac{U}{Z_{dк} + \frac{Z_{qк} Z_c}{Z_{qк} + Z_c}} = \frac{U y_{dк}(y_{qк} + y_c)}{y_{dк} + y_{qк} + y_c}. \quad (389)$$

При включении трехфазного двигателя с короткозамкнутым ротором и диаметральным шагом обмотки статора $k = \frac{1}{\sqrt{3}}$, $y_{dк} \approx 2y_{qк}$.

Пусковой ток

$$I_{п} = \frac{2U(y_{qк} + y_c) y_{qк}}{3y_{qк} + y_c}. \quad (390)$$

Уравновешенный режим двигателя

Знак в уравнении (369) показывает, что если емкостью шунтирована обмотка q, то двигатель вращается в направлении прямой последовательности. В уравновешенном режиме симметричные составляющие токов и напряжений обратной последовательности равны нулю. Из формул (344), (346), (352), (354) находим, что

$$1 + \frac{1}{jk} + \frac{Z_{q1}}{Z_c} = 0. \quad (391)$$

Отсюда

$$Z_c = -\frac{Z_{q1}}{1 + \frac{1}{jk}} = \frac{\frac{x_{q1}}{k} - r_{q1}}{1 + \frac{1}{k^2}} - j\frac{x_{q1} + \frac{r_{q1}}{k}}{1 + \frac{1}{k^2}}. \quad (392)$$

При включении параллельно обмотке q емкостного сопротивления $Z_c = r_c - jx_c$ для получения уравновешенного режима необходимо, чтобы активная и реактивная составляющие определялись соотношениями

$$r_c = \frac{\frac{x_{q1}}{k} - r_{q1}}{1 + \frac{1}{k^2}}, \quad (393)$$

$$x_c = \frac{x_{q1} + \frac{r_{q1}}{k}}{1 + \frac{1}{k^2}}. \quad (394)$$

Используя только активное сопротивление $Z_c = -jx_c$, уравновешенный режим можно получить при

$$k = \frac{x_{q1}}{r_{q1}} = \operatorname{tg} \varphi_{q1} \quad (395)$$

$$\text{и} \quad x_c = x_{q1}. \quad (396)$$

Соотношение (372) показывает, что чем выше коэффициент мощно-

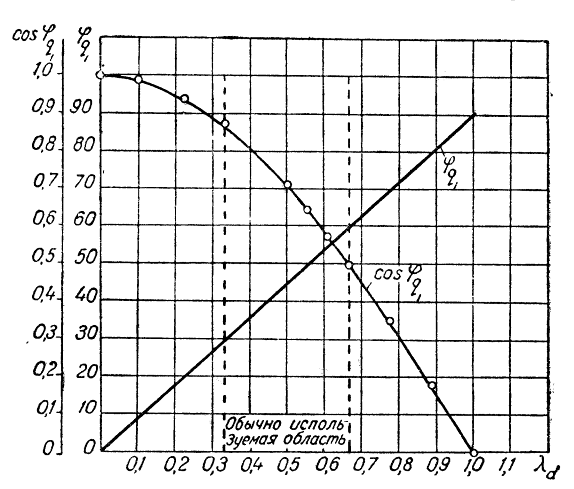


Рис. 75. Зависимость фазового угла и коэффициента мощности, при которых возможен уравновешенный режим, от ширины фазной зоны обмотки *d*.

сти двигателя, тем меньше должно быть эффективное число витков обмотки *d* и тем больше должна быть величина емкости.

Если рассматривать двигатели с полностью обмотанным статором, причем эта обмотка выполнена из меди равного сечения, то

$$k = \frac{w_d k_{d1}}{w_q k_{q1}} = \operatorname{tg} \lambda_d \frac{\pi}{2}. \quad (397)$$

Сравнивая соотношения (395) и (397), находим, что уравновешенный режим может быть получен при использовании чисто реактивного сопротивления, если ширина фазной зоны обмотки *d* в градусах равна аргументу сопротивления фазы *q*

$$\varphi_{q1} = \lambda_d \frac{\pi}{2}. \quad (398)$$

На рис. 75 представлена зависимость коэффициента мощности, при котором возможна работа в уравновешенном режиме, от ширины фазной зоны обмотки *d*.

При $\cos\varphi = 0{,}86$ для возможности уравновешенного режима фазная зона обмотки d должна составлять $^1/_3$, а обмотки q — $^2/_3$. В уравновешенном режиме токи фаз находятся в обратном соотношении

$$\frac{I_d}{I_q} = \frac{1}{k}.$$

Чем меньше k, тем выше $\cos\varphi$, и тем больше ток фазы d. Если $k = \frac{1}{\sqrt{3}}$, то $I_d = \sqrt{3}\, I_q$. Это приводит к перегреву двигателя или его неполному использованию. Если $k = 1$, то $I_d = I_q$ и двигатель используется наилучшим образом. При уравновешенном режиме

$$\dot{I}_d = \dot{I}_{d1} = \frac{\dot{U}}{Z_{d1} - jkZ_{q1}}, \tag{399}$$

$$\dot{I}_q = \dot{I}_{q1} = \frac{\dot{U}}{Z_{q1} - \frac{Z_{d1}}{jk}}, \tag{400}$$

$$\dot{U}_q = \dot{U}_{q1} = \frac{\dot{U}}{1 - \frac{Z_{d1}}{jkZ_{q1}}}. \tag{401}$$

Ток в конденсаторной батарее

$$\dot{I}_c = \frac{\dot{U}}{Z_c\left(1 - \frac{Z_{d1}}{jkZ_{q1}}\right)} = \frac{\dot{U}\left(1 + \frac{1}{jk}\right)}{\frac{Z_{d1}}{jk} - Z_{q1}}. \tag{402}$$

Определим величину реактивной мощности конденсаторной батареи

$$P_k = Im(\overset{*}{U}_q \dot{I}_c), \tag{403}$$

где $\overset{*}{U}_q$ — сопряженный комплекс напряжения на конденсаторной батарее;

$$P_k = Im\frac{U^2\,[kx_{q1} - k^2 r_{q1} + j\,(k^2 x_{q1} + kr_{q1})]}{|Z_{d1}|^2 + k^2\,|Z_{q1}|^2 + 2k\,(r_{d1}x_{q1} - r_{q1}x_{d1})}. \tag{404}$$

Когда шунтирующее сопротивление емкостное ($Z_c = -jx_c$), отношение параметров фазы q в уравновешенном режиме удовлетворяет соотношениям (395) и (396). Мощность конденсаторной батареи может быть определена соотношением

$$P_k = \frac{U^2}{\left|\frac{Z_{d1}}{Z_{q1}}\right|^2 \frac{r_{q1}^2}{x_{q1}} + x_{q1} + 2\cos\varphi_{q1} Z_{d1} \sin(\varphi_{q1} - \varphi_{d1})}. \tag{405}$$

Углы сдвига фаз в обмотках d и q в сбщем случае не равны. Однако можно принять при определении мощности конденсаторной батареи, что

$$\varphi_{d1} = \varphi_{q1}, \quad \sin(\varphi_{q1} - \varphi_{d1}) = 0.$$

При этом мощность конденсаторной батареи

$$P_k = \frac{U^2}{\frac{r_{q1}^2}{x_{q1}} \left| \frac{Z_{d1}}{Z_{q1}} \right|^2 + x_{q1}}.$$

Если дальше принять, что модули полных сопротивлений фаз относятся как квадраты эффективных чисел витков, $\frac{Z_{d1}}{Z_{q1}} = k^2$, то для мощности конденсаторной батареи находим значение

$$P_k = \frac{U^2}{(k^2+1)\,x_{q1}} = \frac{U_{q\text{н}}^2}{x_{q1}}. \qquad (406)$$

Таким образом, мощность конденсаторной батареи равна реактивной мощности шунтируемой фазы.

Рассматривая влияние на характеристики ОКД ширины фазной зоны, находим, что при уменьшении последней, а также числа витков обмотки q уравновешенный режим достигается при меньшем внутреннем $\cos\varphi_1$. Мощности двигателя в уравновешенном режиме и конденсаторной батареи будут тем меньше, чем меньшими будут число витков и фазная зона обмотки q.

При симметричных обмотках двигателя уравновешенный режим имеет место при $\cos\varphi = 0{,}707$, $x_{q1} = r_{q1} = \frac{Z_{q1}}{\sqrt{2}}$ и мощность конденсаторной батареи равна

$$P_k = \sqrt{2}\,\frac{U_q^2}{Z_{q1}} = \frac{U^2}{\sqrt{2}\,Z_{q1}}. \qquad (407)$$

Мощность двухфазного симметричного двигателя

$$P_1\,[\textit{ва}] = \frac{2U_q^2}{Z_{q1}} = \frac{2U^2}{(\sqrt{2})^2 Z_{q1}} = \frac{U^2}{Z_{q1}} = \sqrt{2}\,P_1\,[\textit{вт}], \qquad (408)$$

поэтому

$$P_k = P_1\,[\textit{вт}]. \qquad (409)$$

Таким образом, мощность конденсаторной батареи при симметричных обмотках равна номинальной активной мощности, потребляемой двигателем из двухфазной сети.

При включении трехфазного симметричного двигателя, у которого $\cos\varphi = 0{,}866$ и $\lambda_q = {}^2/_3$, мощность конденсаторной батареи в уравновешенном режиме

$$P_k = \frac{U_{q\text{н}}^2}{x_{q1}} = \frac{2U_{q\text{н}}^2}{Z_{q1}}. \tag{410}$$

Но $Z_{q1} = 2Z$ и мощность трехфазного двигателя

$$P_1[\mathit{ва}] = 3U_\text{ф}I_\text{ф} = \frac{3\left(\frac{U_q}{\sqrt{3}}\right)^2}{Z} = \frac{U_q^2}{Z}. \tag{411}$$

Поэтому

$$P_k = P_1[\mathit{ва}] = \frac{P_1[\mathit{вт}]}{0{,}866} = 1{,}16\,P_1[\mathit{вт}]. \tag{412}$$

Следовательно, в уравновешенном режиме мощность конденсаторной батареи однофазного двигателя на 16% больше, чем активная мощность исходного трехфазного. Симметричные двухфазные двигатели требуют меньшей мощности конденсаторной батареи, обеспечивают равномерную нагрузку фаз, лучшее использование мощности габарита и потому более приемлемы, чем двигатели с несимметричными обмотками.

Сдвиг по фазе тока сети относительно напряжений может быть определен из соотношения (348). Полное сопротивление двигателя по отношению к сети

$$Z_\text{об} = \frac{jk\Delta}{-2 - \frac{Z_{q2}}{Z_c} - \frac{Z_{q1}}{Z_c}}. \tag{413}$$

Определяя активную и реактивную составляющие, можно определить также внешний коэффициент мощности двигателя.

В уравновешенном режиме, как можно видеть из (399),

$$Z_\text{об} = Z_{d1} - jkZ_{q1} = r_{d1} + \frac{x_{q1}^2}{r_{q1}} + j(x_{d1} - x_{q1}). \tag{414}$$

Если обмотки двигателя симметричны, $x_{d1} = x_{q1}$, коэффициент мощности двигателя по отношению к сети равен единице, общее сопротивление двигателя активное и определяется соотношением

$$Z_\text{об} = 2r_{d1}.$$

При использовании трехфазного двигателя в качестве однофазного и при $\lambda_q = {}^2/_3$ соотношение между параметрами фаз d и q можно приближенно выразить так:

$$\frac{x_{q1}}{x_{d1}} = \frac{2}{{}^2/_3} = 3.$$

Поэтому для однофазного двигателя, получаемого из трехфазного,

$$Z_{об} = r_{d1} + \frac{x_{q1}^2}{r_{q1}} - j\frac{2}{3}x_{q1}. \qquad (416)$$

Приближенно можно принять, что

$$\frac{r_{q1}}{r_{d1}} = 3;$$

тогда для $Z_{об}$ из (416) находим

$$Z_{об} = 2\frac{x_{q1}^2}{r_{q1}} - j\frac{2}{3}x_{q1} = \frac{2}{3}(r_{q1} - jx_{q1}). \qquad (417)$$

Следовательно, при вклю ении трехфазного двигателя, у которого $\cos\varphi = 0,866$ и $\varphi_q = {}^2/_3$, внешний коэффициент мощности однофазного двигателя в уравновешенном режиме будет опережающим и равным $\cos\varphi_{сети} = 0,866$. Двигатель отдает реактивную энергию в сеть

Выбор емкости из условий равенства токов фаз

При включении трехфазных двигателей по схеме, показанной на рис. 72, величина емкости и нагрузка выбираются из условия равенства токов фаз по модулю. При этом уравнения (347) и (348) приводят к равенству

$$\left|\frac{Z_{q2} - Z_{q1}}{Z_c} - \frac{2}{jk}\right| = \frac{1}{k}\left|2 + \frac{Z_{q2} + Z_{q1}}{Z_c}\right|. \qquad (418)$$

При

$$Z_c = -jx_c, \quad Z_{q2} = r_{q2} + jx_{q2}, \quad Z_{q1} = r_{q1} + jx_{q1}$$

находим

$$\frac{x_c}{|Z_{q1}|} = \frac{1}{4}\cdot\frac{(1-k^2)(1+\beta^2) + 2\beta(1+k^2)\cos(\varphi_{q2} - \varphi_{q1})}{\beta(\sin\varphi_{q2} + k\cos\varphi_{q2}) + \sin\varphi_{q1} - k\cos\varphi_{q1}}, \qquad (419)$$

где

$$\beta = \left|\frac{Z_{q2}}{Z_{q1}}\right| = \frac{I_н}{I_{2-s}};$$

$$\operatorname{tg}\varphi_{q1} = \frac{x_{q1}}{r_{q1}}; \quad \operatorname{tg}\varphi_{q2} = \frac{x_{q2}}{r_{q2}}.$$

Для симметричного двухфазного двигателя $k = 1$. Из (396) следует, что при $\cos\varphi_{q1} = \sin\varphi_{q1}$, если $\cos(\varphi_{q2} - \varphi_{q1}) = \sin\varphi_{q1}(\cos\varphi_{q2} + \sin\varphi_{q2})$, относительное значение емкости $\frac{x_c}{z_{q1}} = \sin\varphi_{q1}$ и $x_c = x_{q1}$, что совпадает с полученными ранее результатами.

Для однофазного двигателя, полученного из трехфазного, при $k = \frac{1}{\sqrt{3}}$ соотношение (419) может быть записано

$$\frac{x_c}{|Z_{q1}|} = \frac{1}{6} \cdot \frac{1 + \beta^2 + 4\beta \cos(\varphi_{q2} - \varphi_{q1})}{\beta(\sin\varphi_{q2} + 0{,}577\cos\varphi_{q2}) + \sin\varphi_{q1} - 0{,}577\cos\varphi_{q1}}. \quad (420)$$

Коэффициент β зависит от углов сдвига тока при φ_{q_1} — номинальной нагрузке и φ_{q_2} — в режиме противовключения. Однако эта зависимость не может быть выражена простым соотношением. В каталогах эти величины не приводятся, поэтому точное определение x_c по данным каталога затруднительно. Весьма желательно определить рабочую емкость по данным номинального режима и опыта короткого замыкания трехфазного двигателя.

В табл. 16 приводятся основные параметры двигателей АОС 51/4, МА 142-1/6, А 42-4, А 41-4, а также значения рабочей емкости, вычисленные по точным значениям β и φ_{q2}, и по значениям их в пусковом режиме.

Таблица 16

Тип двигателя	$P_н$, *квт*	$s_н$, %	$I_{н.ф.}$, *а*	$U_{н.ф.}$, *в*	$\cos\varphi_н$	$\frac{I_к}{I_н}$	$\cos\varphi_к$	β	$\cos\varphi_{q_2}$	$C_р$, *мкф*	$C_р$, *мкф* (приближенное значение)
АОС 51-4	4,5	11	10,4	220	0,86	5	0,647	0,281	0,55	72,7	75,9
МА 142-1/6	3,8	4	8,9	220	0,77	3,44	0,437	0,267	0,422	94,6	95
А 42-4	2,8	5,34	6,1	220	0,84	4,53	0,49	0,21	0,437	41,2	44,3
А 41-4	1,7	5,34	3,8	220	0,83	4	0,53	0,233	0,47	38,6	30,8

Из изложенного следует, что для приближенных расчетов рабочей емкости можно пользоваться параметрами номинальной нагрузки и короткого замыкания.

Графо-аналитический способ расчета характеристик

Расчеты характеристик ОКД при последовательном соединении обмоток по соотношениям (340) — (355) связаны со значительными трудностями. Расчеты можно значительно упростить, допустив, что

$$\frac{Z_{d1}}{Z_{q1}} = \frac{Z_{d2}}{Z_{q2}} = k^2.$$

Аналитические соотношения становятся более наглядными, их можно использовать для графических построений искомых величин.

Главный определитель Δ по формуле (342) при замене сопротивлений проводимостями записывается так:

$$\Delta = \frac{j(1+k^2)}{k y_{q1} y_{q2}} 2\dot{a}, \quad (421)$$

где

$$\dot{a} = \frac{y_{q1} + y_{q2}}{2} + \frac{k^2}{1+k^2} y_c. \quad (422)$$

Относительные значения напряжений прямой и обратной последовательности (363) и (364)

$$\bar{U}_{q1} = \frac{\dot{U}_{q1}}{U_{q\text{н}}} = \frac{1 - jk}{\sqrt{1+k^2}} \cdot \frac{\dot{b}}{2\dot{a}}, \quad (423)$$

$$\bar{U}_{q2} = \frac{\dot{U}_{q2}}{U_{q\text{н}}} = \frac{1 + jk}{\sqrt{1+k^2}} \cdot \frac{\dot{c}}{2\dot{a}}, \quad (424)$$

$$\dot{b} = y_{q2} - \left(\frac{jk}{1+k^2} - \frac{k^2}{1+k^2}\right) y_c, \quad (425)$$

$$\dot{c} = y_{q1} + \left(\frac{jk}{1+k^2} + \frac{k^2}{1+k^2}\right) y_c. \quad (426)$$

После несложных преобразований в формулах для симметричных составляющих токов прямой и обратной последовательности фаз d и q находим

$$\dot{I}_{q1} = \dot{I}_s \bar{U}_{q1}, \quad (427)$$

$$\dot{I}_{q_2} = \dot{I}_{2-s} \bar{U}_{q2}, \quad (428)$$

$$\dot{I}_{d_1} = \frac{j}{k} \dot{I}_s \bar{U}_{q1}, \quad (429)$$

$$\dot{I}_{d_2} = -\frac{j}{k} \dot{I}_{2-s} \bar{U}_{q2}, \quad (430)$$

где

$$\dot{I}_s = U_{q\text{н}} y_{q1}; \quad (431)$$

$$\dot{I}_{2-s} = U_{q\text{н}} y_{q2}. \quad (432)$$

Величины $\dot{a}$, $\dot{b}$, $\dot{c}$ можно выразить через токи $\dot{I}_s$ и $\dot{I}_{2-s}$. Для этого необходимо и числитель и знаменатель в соотношениях (423) — (426) умножить на номинальное напряжение фазы q.

Если ток, проходящий через конденсаторы

$$\dot{I}_{c\text{н}} = U_{q\text{н}} y_c, \quad (433)$$

то

$$\dot{a} = \frac{1}{2}(\dot{I}_s + \dot{I}_{2-s}) - \left(-\frac{k^2}{1+k^2} \dot{I}_{c\text{н}}\right), \quad (434)$$

$$\dot{b} = \dot{I}_{2-s} - \left(\frac{jk - k^2}{1 + k^2} \dot{I}_{сн} \right), \tag{435}$$

$$\dot{c} = \dot{I}_s - \left(\frac{-jk - k^2}{1 + k^2} \dot{I}_{сн} \right). \tag{436}$$

Напряжение фазы q и конденсаторной батареи

$$\dot{U}_q = \dot{U}_c = \frac{\dot{U}}{\sqrt{1 + k^2}} (\bar{U}_{q1} + \bar{U}_{q2}). \tag{437}$$

Напряжения прямой и обратной последовательностей фазы d определяются соотношениями

$$U_{d1} = \dot{U} \frac{k^2}{1 + k^2} \left(1 + \frac{j}{k} \right) \frac{\dot{b}}{2\dot{a}} = U_{dн} j \bar{U}_{q1}, \tag{438}$$

$$\dot{U}_{d_2} = U \frac{k^2}{1 + k^2} \left(1 - \frac{j}{k} \right) \frac{\dot{c}}{2\dot{a}} = U_{dн} (-j) \bar{U}_{q2}. \tag{439}$$

Величины $\dot{a}$, $\dot{b}$, $\dot{c}$ представлены нами как разность двух чисел. Графически разность двух векторов определить проще, чем сумму. Из всего изложенного следует, что приближенно характеристики двигателя могут быть рассчитаны на основании круговой диаграммы фазы q. Моменты рассчитываются по уравнениям (162) и (163).

Для однофазного двигателя с симметричными обмотками ($k = 1$) расчетные соотношения значительно упрощаются. Так,

$$a = \frac{1}{2} \left(\dot{I}_s + \dot{I}_{2-s} \right) - \left(-\frac{1}{2} \dot{I}_{сн} \right), \tag{440}$$

$$\dot{b} = \dot{I}_{2-s} - \left(\frac{j - 1}{2} \dot{I}_{сн} \right), \tag{441}$$

$$\dot{c} = \dot{I}_s - \left(\frac{-j - 1}{2} \dot{I}_{сн} \right), \tag{442}$$

$$\bar{U}_{q1} = \frac{1 - j}{\sqrt{2}} \frac{\dot{b}}{2\dot{a}} \tag{443}$$

$$\bar{U}_{q2} = \frac{1 + j}{\sqrt{2}} \frac{\dot{c}}{2\dot{a}}. \tag{444}$$

Графическое определение векторов $\dot{a}$, $\dot{b}$, $\dot{c}$, $\dot{I}_s$, $\dot{I}_{2-s}$ при $k = 1$ приведено на рис. 76. Для ОКД при $k = \frac{1}{\sqrt{3}}$

$$\dot{a} = \frac{1}{2} (\dot{I}_s + \dot{I}_{2-s}) - \left(-\frac{1}{4} \dot{I}_{сн} \right), \tag{445}$$

$$\dot{b} = \dot{I}_{2-s} - \frac{j\sqrt{3} - 1}{4}\, \dot{I}_{сн}, \tag{446}$$

$$\dot{c} = \dot{I}_s - \frac{-j\sqrt{3} - 1}{4}\, \dot{I}_{сн}, \tag{447}$$

$$\bar{U}_{q1} = \frac{\sqrt{3} - j}{2} \cdot \frac{\dot{b}}{2\dot{a}}, \tag{448}$$

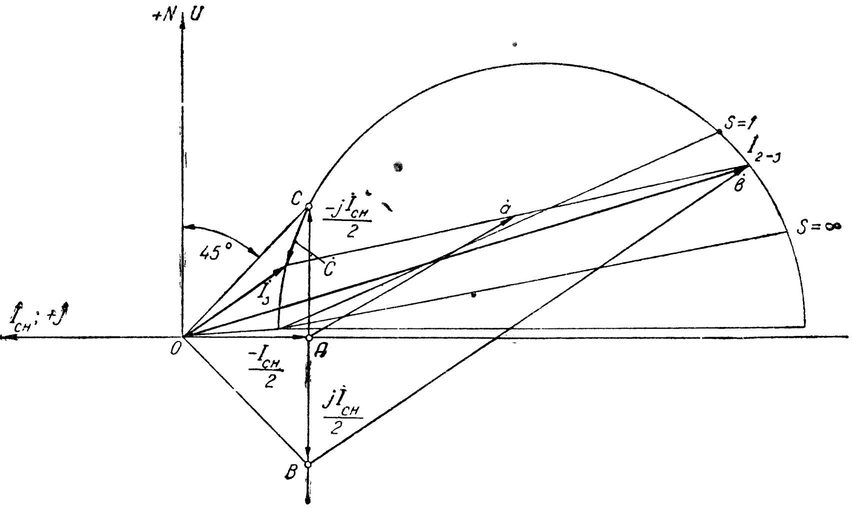


Рис. 76. Определение векторов $\dot{a}$, $\dot{b}$, $\dot{c}$, $\dot{I}_s$ $\dot{I}_{2-s}$ для двигателя с симметричными последовательно соединенными обмотками.

$$\bar{U}_{q2} = \frac{\sqrt{3} + j}{2} \cdot \frac{\dot{c}}{2\dot{a}}. \tag{449}$$

Графическое определение векторов $\dot{a}$, $\dot{b}$, c, $\dot{I}_s$, $\dot{I}_{2-s}$ при $k = \frac{1}{\sqrt{3}}$ изображено на рис. 77.

Приведенные на рис. 76 и 77 построения позволяют определить величину емкости, необходимую для получения уравновешенного режима при скольжении s. Вектор $\dot{C}$ для этого должен быть равен нулю, а нормальный емкостный ток должен определяться соотношением

$$\dot{I}_{сн} = -\dot{I}_s + \frac{j}{k}\dot{I}_s. \tag{450}$$

При использовании емкостного шунтирующего сопротивления, когда $\dot{I}_{сн} = jI_{сн} = j\omega C U_{qн}$, уравновешенный режим возможен при

$$k = \operatorname{tg}\varphi, \tag{451}$$

$$I_{сн} = \frac{I_s}{\sin\varphi}, \tag{452}$$

$$C = \frac{I_s \cdot 10^6}{\omega U_{qн} \sin\varphi} \ [мкф]. \tag{453}$$

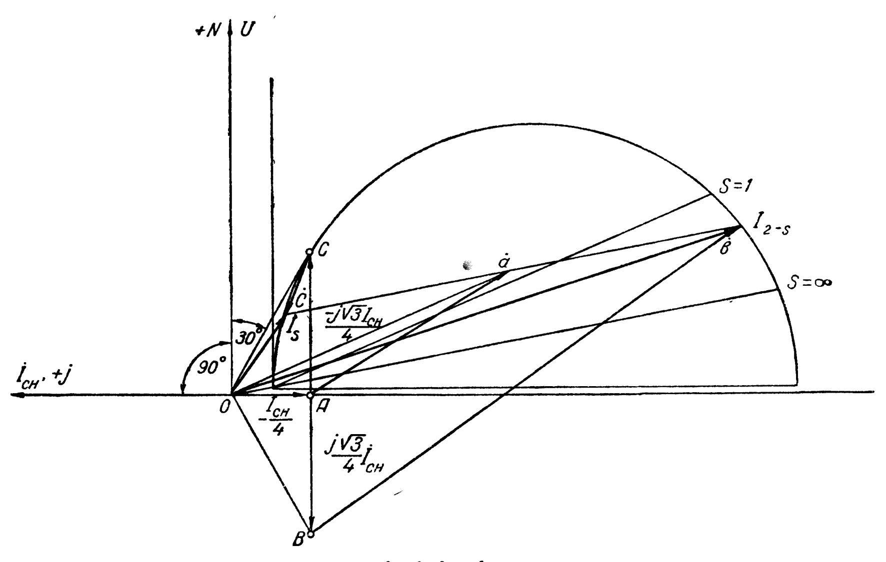


Рис. 77. Определение векторов $\dot{a}$, $\dot{b}$, $\dot{c}$, $\dot{I}_s$, $\dot{I}_{2-s}$ для двигателя с последовательно соединенными обмотками при $к = \frac{1}{\sqrt{3}}$.

Можно также найти шунтирующую емкость, при которой обратное поле будет минимальным, если условия (451) и (452) не могут быть удовлетворены. При этом

$$I_{сн} \approx \sqrt{1 + \frac{1}{k^2}}\, I_s \tag{454}$$

и

$$C = \frac{\sqrt{1+k^2}}{k} \cdot \frac{I_s 10^6}{\omega U_{qн}} = \left(k + \frac{1}{k}\right)\frac{I_s}{\omega U} 10^6 [мкф], \tag{455}$$

где I_s — ток фазы q в амперах при скольжении s и круговом вращающемся поле; $U_{qн}$—номинальное напряжение фазы q. Однако, при этом токи в фазах не равны — одна из фаз перегружена по току.

Использование трехфазных двигателей в качестве однофазных при последовательном включении обмоток статора

При последовательном включении обмоток статора трехфазного двигателя номинальное напряжение однофазной сети $U = 2U_{н.ф}$, где $U_{н.ф}$ —номинальное фазное напряжение трехфаз-

ного двигателя. При $U_{н.ф}=220$ *в* независимо от того, включены ли конденсаторы параллельно двум последовательно включенным фазам ($\lambda_q = {}^2/_3$) или конденсаторы шунтируют одну фазу ($\lambda_q = {}^1/_3$) имеем $U=440$ *в*.

Ширина фазных зон главной и вспомогательной обмоток выбирается в зависимости от коэффициента мощности трехфазного двигателя по рис. 75. Для двигателей с высоким коэффициентом мощности ($\cos\varphi > 0{,}7$) конденсаторы шунтируют две последовательно включенные фазы трехфазного двигателя ($\lambda_q = {}^2/_3$).

В ОКД высшие гармоники проявляются более резко. При неправильном соотношении чисел пазов статора и ротора появляются паразитные синхронные и асинхронные моменты, препятствующие разгону двигателя.

Как при параллельном, так и при последовательном включении обмоток не все двигатели серии А могут быть использованы в качестве однофазных. Значительные затруднения возникают, например, при использовании двухполюсных машин. Исследования показали, что двигатель АЛ 32-2 ($P=1{,}7$ *квт*, $n_c = 3000$ об/мин) не может быть использован в качестве однофазного ни при параллельном, ни при последовательном включении обмоток вследствие значительного влияния высших нечетных гармоник.

В четырехполюсных машинах в большинстве случаев высшие гармоники проявляются слабо. Синхронные моменты при неподвижном роторе не возникают ни при симметричном, ни при однофазном включении. Асинхронные моменты проявляются, однако влияние наиболее сильно выраженной третьей пространственной гармоники при последовательном включении главной и вспомогательной обмоток ослаблено.

На рис. 78—86 приведены основные характеристики однофазных четырех-, шести- и восьмиполюсных двигателей при последовательном включении обмоток и различных величинах емкости. Характеристики получены опытным путем при использовании тормозной машины по методу И. П. Боляева [75]. Сравнительные данные однофазных двигателей при последовательном включении обмоток приведены в табл. 17. Как и при параллельном включении обмоток, рабочая емкость подобрана опытным путем так, чтобы токи фаз были примерно равны номинальному. Полезная мощность однофазного двигателя при этом составляет 80% для двигателей АОЛ 31-4М, А 42-4, МА 142-${}^1/_8$ и 70%—для двигателя А 41-6.

При рабочей емкости пусковой момент однофазного двигателя невелик (6—22%). При последовательном включении обмоток и рабочей емкости минимальный момент близок к пусковому, так как ток фазы *d*, создающий третью пространственную гармонику, невелик ($I_d = 1{,}9—2{,}7$).

Влияние емкости на пусковые и рабочие характеристики показано семейством характеристик двигателя АОЛ 31-4М при

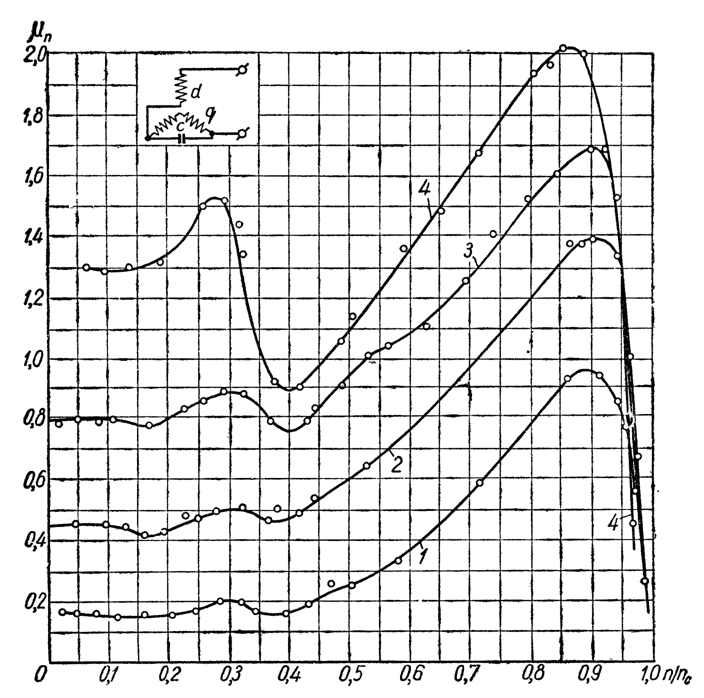


Рис. 78. Механические характеристики двигателя АОЛ 31-4М при последовательном включении обмоток ($\lambda_d = {}^1/_3$, $\lambda_q = {}^2/_3$, $U_н = 440$ *в*, $P_н = 0{,}6$ *квт*, $I_н = 1{,}6$ *а*, $M_н = 0{,}415$ *кгм*, $n_c = 1500$ об/мин):

1 — C = 15,3 мкф; 2 — C = 35,2 мкф, 3 — C = 55.2 мкф; 4 — C = 89,8 мкф.

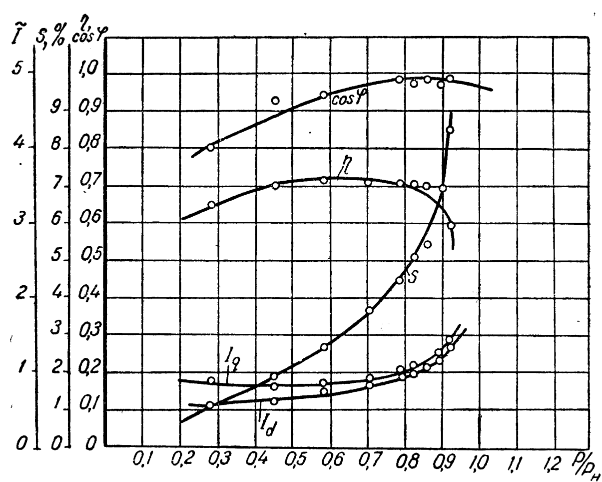


Рис. 79. Рабочие характеристики двигателя АОЛ 31-4М при последовательном включении обмоток

($C = 15{,}3$ *мкф*, $U_н = 440$ *в*, $I_н = 1{,}6$ *а*, $P_н = 0{,}6$ *квт*).

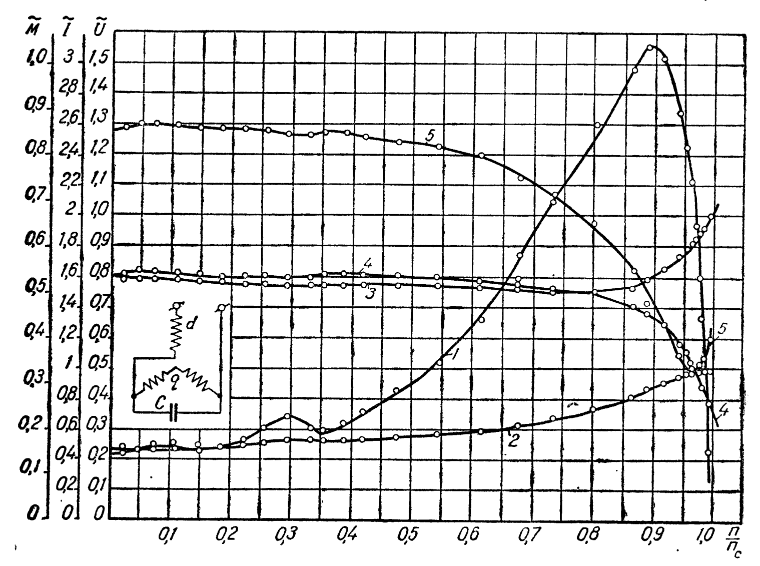


Рис. 80. Характеристики двигателя А 41-6 при последовательном включении обмоток

($C=36{,}9$ *мкф*, $U_н=440$ *в*, $I_н=2{,}8$ *а*, $M_н=1{,}05$ *кгм*, $P_н=1$ *квт*, $n_c=1000$ об/мин):
1 — $\bar{M}$; 2 — $\bar{U}_d$; 3 — $\bar{U}_q$; 4 — $\bar{I}_d$; 5 — $\bar{I}_q$.

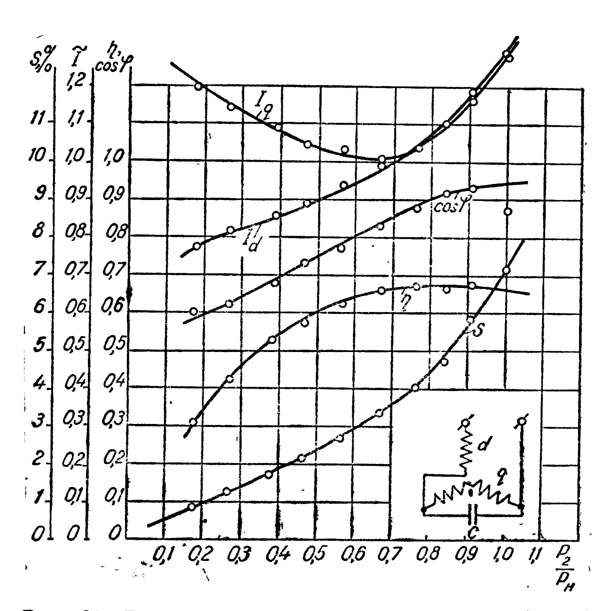


Рис. 81. Рабочие характеристики двигателя А 41-6 при последовательном включении обмоток.

($C=36{,}9$ *mkф*, $U_н=440$ *в*, $I_н=2{,}8$ *а*, $P_н=1{,}0$ *квт*, $M_н=1{,}05$ *кгм*).

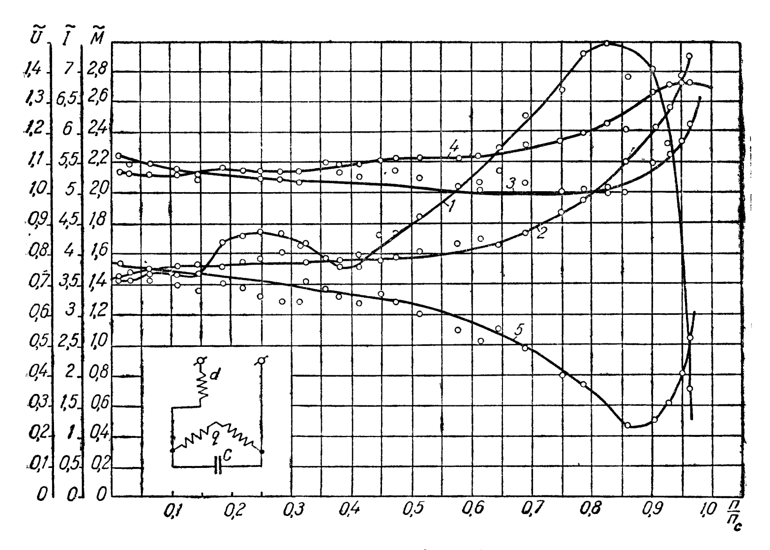


Рис. 82. Характеристика двигателя А 41-6 при последовательном включении обмоток.

(C=148 *мкф*, $U_н$=440 *в*, $I_н$=2,8 *а*, ($P_н$=1,0 *квт*, $M_н$=1,05 *кгм*, $n_с$=1000 об/мин) 1—$\bar{M}$; 2—$\bar{U}_d$; 3—$\bar{U}_q$=; 4—$\bar{I}_d$),5—$\bar{I}_q$.

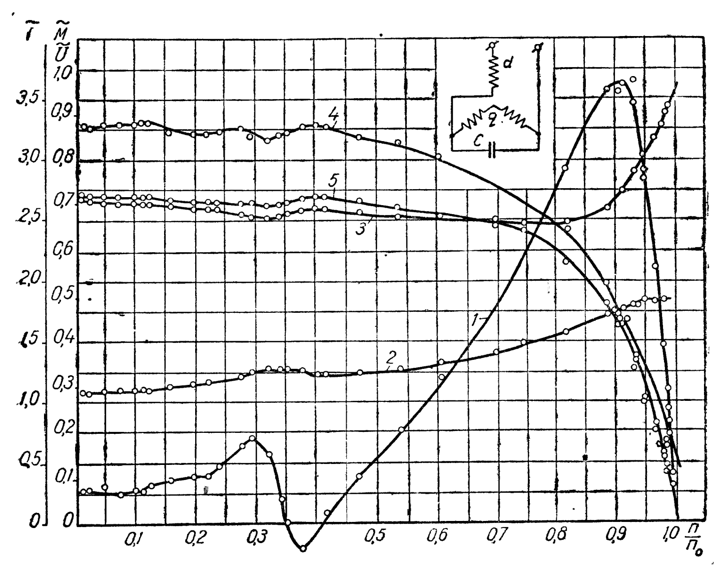


Рис. 83. Характеристики двигателя А 42-4 при последовательном включении обмоток.

(C=43,5 *мкф*, Uн=440 *в*, $I_н$=6,1 *а*, $P_н$=2,8 *квт*, $M_н$=1,92 *кгм*, $n_с$=1500 об/мин); 1—$\bar{M}$; 2—$\bar{U}_d$; 3—$\bar{U}_q$: 4=$\bar{I}_d$; 5—$\bar{U}_q$.

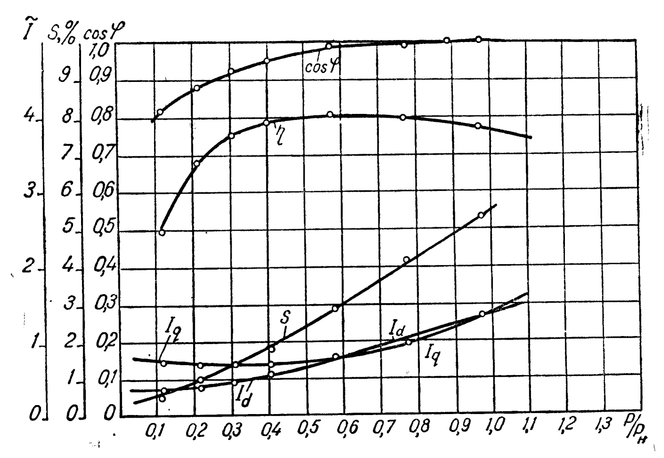


Рис. 84. Рабочие характеристики двигателя А 42-4 при последовательном включении обмоток

($C=43{,}5$ *мкф*. $U_н=440$ *в*. $P_н=2{,}8$ *квт*, $I_н=6{,}1$ *а*, $M_н=1{,}92$ *кгм*)

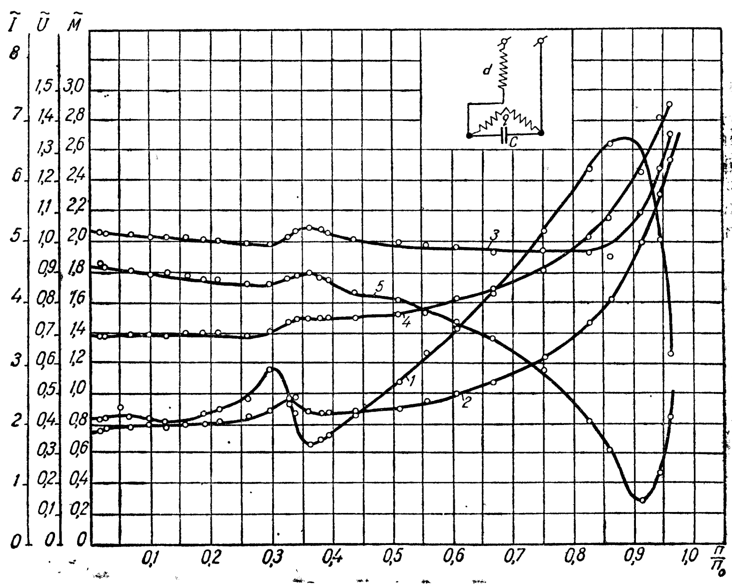


Рис. 85. Характеристики двигателя А 42-4 при последовательном включении обмоток

($C=271{,}2$ *мкф*, $U_н=440$ *в*, $I_н=6{,}1$ *а*, $P_н=2{,}8$ *квт*. $M_н=1{,}92$ *кгм*, $n_c=1500$ об/мин): 1—$\bar{M}$; 2—$\bar{U}_d$; 3—$\bar{U}_q$; 4—$\bar{I}_d$; 5—$\bar{I}_q$.

Параметр	Тип двигателя					
	АОЛ 31-4М					
	Симметричная работа *	$C=15{,}3$ *мкф*, $\lambda_d=1/3$, $\lambda_q=2/3$	$C=20$ *мкф*, $\lambda_d=1/3$, $\lambda_q=2/3$	$C=35{,}2$ *мкф*, $\lambda_d=1/3$, $\lambda_q=2/3$	$C=55{,}2$ *мкф*, $\lambda_d=1/3$, $\lambda_q=2/3$	$C=89{,}8$ *мкф*, $\lambda_d=1/3$, $\lambda_q=2/3$
Напряжение сети, *в*	220/38	440	440	440	440	—
Номинальная мощность, *квт*	0,6	—	—	—	—	—
Номинальный ток, *а*	1,6	—	—	—	—	—
$P_2/P_н$	—	0,8	0,82	—	—	—
$\overset{\frown}{I}_d$, *а*	—	0,95	1,06	—	—	—
$\overset{\frown}{I}_q$, *а*	—	1,0	0,95	—	—	—
К. п. д., %	74	71	72	—	—	—
$\cos\varphi$	0,77	0,99	0,92	—	—	—
$M_{max}/M_н$	2,0	0,95	1,02	1,39	1,7	2,02
$M_п/M_н$	1,8	0,16	0,18	0,42	0,8	1,3
$M_{min}/M_н$	—	0,15	0,16	0,42	0,76	0,9
$I_п/I_н$	5,0	1,89	1,89	2,2	3,05	5,4
s, % } при P_2	6	4,7	4,1	—	—	—
$U_с/U_{сети}$, *в* } при P_2	—	0,84	0,88	1,0	1,1	0,95
$U_с/U_{сети}$ *в*, при $P_2=0$	—	0,95	1,0	1,12	1,23	1,0
Номинальное напряжение конденсатора, *в*	—	440	440	440	440	440
Мощность конденсаторной батареи, *квар*	—	0,93	1,22	2,14	3,35	5,46
$M_н$, *кг*	0,415	0,415	0,415	0,415	0,415	0,415

емкостях 15,3; 35,2; 55,2 и 89,8 *мкф*. При увеличении емкости пусковой момент увеличивается. Однако при больших емкостях заметно увеличиваются ток фазы d и паразитные моменты от третьей гармоники (см. рис. 78).

Аналогичная картина характерна и для других типов машин. По-видимому, можно считать, что пусковая емкость должна быть в четыре — шесть раз больше рабочей, причем чем выше коэффициент мощности двигателя, тем больше кратность пусковой емкости по отношению к рабочей.

Общий характер изменения токов фаз таков: при малых емкостях и неподвижном роторе ток фазы d меньше, чем фазы q; при увеличении скорости до номинальной токи уменьшаются; при увеличении скорости вращения ротора до синхронной ток

* По данным каталога

Таблица 17

и режим

А 42-4				МА 142-1/8			А 41-6		
Симметричная работа	$C=43{,}4$ *мкф*, $\lambda_d=1/3$, $\lambda_q=2/3$	$C=271{,}2$ *мкф*, $\lambda_d=1/3$, $\lambda_q=2/3$	$C=350$ *мкф*, $\lambda_d=1/3$, $\lambda_q=2/3$	Симметричная работа	$C=104{,}35$ *мкф*, $\lambda_d=1/3$, $\lambda_q=2/3$	$C=290$ *мкф*, $\lambda_d=1/3$, $\lambda_q=2/3$	Симметричная работа	$C=36{,}9$ *мкф*, $\lambda_d=1/3$, $\lambda_q=2/3$	$C=148$ *мкф*, $\lambda_d=1/3$, $\lambda_q=2/3$
220/380	440	440	440	220/380	440	440	220/380	440	440
2,8	—	—	—	2,7	—		1,0	—	—
6,1	—	—	—	7,3	—	—	2,8	—	—
—	0,8	—	—	—	0,8	—	—	0,7	—
—	1,07	—	—	—	1,0	—	—	1,0	—
—	1,0	—	–	—	1,05	—	—	1,01	—
83,5 (83,5)	79	—	—	83	79	—	77	67	—
0,85 (0,85)	0,99	—	—	0,7	0,87	—	0,72	0,86	—
2,2 (2,28)	0,97	2,85	3,93	2,1	1,25	2,68	1,97	1,56	3,0
1,9 (1,6)	0,067	0,84	1,5	1,4	0,2	0,9	1,2	0,22	1,43
(1,5)	—0,03	0,65	0,83	1,2	0,05	0,75	1,2	0,22	1,43
6,0 (4,5)	2,7	3,4	6,1	3,8	1,74	3,2	3,3	1,64	5,3
5,33 (4,51	4,2	—	—	3,2	2,7	—	7	3,5	—
—	0,81	1,36	1,2	—	0,9	1,5	—	0,93	1,23
—	0,93	—	—	—	1,02	—	—	1,0	1,3
—	440	440	440	—	440	440	—	440	440
—	2,63	16,4	21,3	—	6,35	17,6	—	2,24	9,0
1,92	1,92	1,92	1,92	3,66	3,66	3,66	1,05	1,05	1,05

фазы q увеличивается, что связано с резонансными явлениями. Правильный выбор величины емкости имеет большое значение, так как при уменьшении нагрузки на валу машина перегревается. Для двигателя АОЛ 31-4 при холостом ходе и $C=15{,}3$ *мкф*, ток фазы q меньше номинального. При $C=20$ *мкф* на холостом ходу ток фазы несколько больше номинального ($\bar{I}_q=1{,}1$). При рабочей емкости $C=43{,}4$ *мкф* у двигателя А42-4 на холостом ходу увеличения токов фаз не наблюдается ($\bar{I}=0{,}8$, $\bar{I}_d=0{,}3$).

Рассматриваемые два двигателя АОЛ31-4М и А42-4 имеют высокий коэффициент мощности (0,77 и 0,85 соответственно). Если коэффициент мощности мал (0,7 и 0,72), то при рабочей емкости на холостом ходу ток конденсаторной фазы больше номинального.

Для МА 142- 1/8 имеем $I_q=1{,}3$ при $C=104{,}4$ *мкф* и $P_2=0$. Для

А 41-6 имеем $\tilde{I}_q = 1{,}3$ при $\tilde{P}_2 = 0$ и $C = 36{,}9$ *мкф* (см. рис. 81).

В табл. 18 и 19 приведены основные показатели двигателя АОЛ 31-4М соответственно при последовательном и параллельном включении обмоток и различных значениях емкостей. За номинальные принимаются напряжения сети. Как видно из

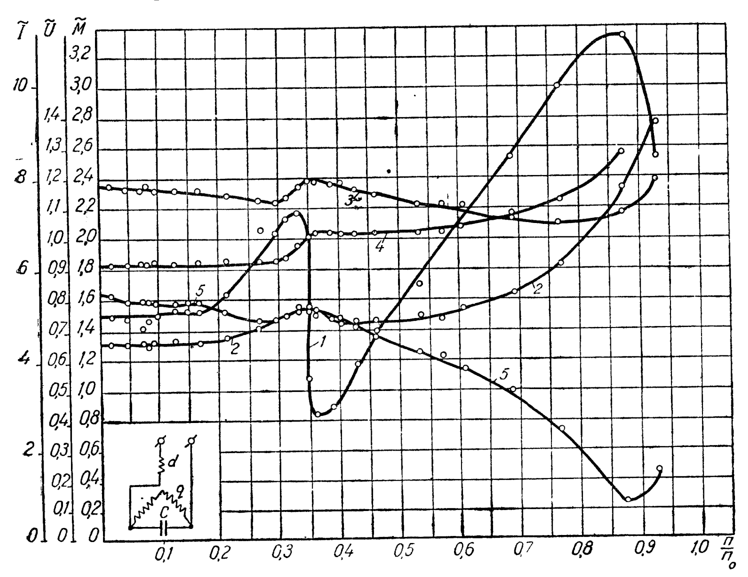


Рис. 86. Характеристики двигателя А 42-4 при последовательном включении обмоток

($C=350$ *мкф*, $U_н=440$ *в*, $I_н=6{,}1$ *а*, $P_н-2{,}8$ *квт*, $M_н=1{,}92$ *кгм*, $n_с = 1500$ об/мин): $1-\tilde{M}$; $2-\tilde{U}_d$; $3-\tilde{U}_q$; $4-\tilde{I}_d$; $5-\tilde{I}_q$.

Таблица 18

C, *мкф*	Идеальный холостой ход				Неподвижный ротор				μ_{max}	$\mu_п$	μ_{min}
	i_d	i_q	$\bar{U}_d$	$\bar{U}_q$	i_d	i_q	$\bar{U}_d$	$\bar{U}_q$			
15,3	0,39	0,97	0,47	0,96	1,88	2,5	0,276	0,75	0,95	0,16	0,15
20	0,667	1,11	0,497	0,995	1,88	2,62	0,273	0,765	1,1	0,175	0,165
35,2	1,78	1,52	0,63	1,07	2,23	2,8	0,354	0,816	1,4	0,45	0,42
55,2	3,94	2,185	0,912	1,23	3,04	3,0	0,44	0,92	1,7	0,8	0,76
89,8	7,01	2,3	1,255	0,99	5,4	3,0	0,716	0,85	2,03	1,3	0,9

табл. 18 и 19 при последовательном включении обмоток минимальные моменты во время пуска, как правило, выше, пусковые токи меньше, токи идеального холостого хода ниже, чем соответствующие величины двигателя при параллельном включении обмоток.

Таблица 19

C, мкф	Идеальный холостой ход					Неподвижный ротор					μ_{max}	$\mu_п$	μ_{min}
	i_d	i_q	$i_{сети}$	$\bar{U}_d$	$\bar{U}_q$	i_d	i_q	$i_{сети}$	$\bar{U}_d$, в	$\bar{U}_q$, в			
12,5	1,18	0,770	0,54	0,656	1,32	0,97	2,93	2,50	0,137	1,13	1,09	0,2	0,16
2,0	2,1	0,84	1,29	0,81	1,4	1,78	2,83	2,50	0,313	1,22	1,37	0,41	0,39
54,6	6,67	1,74	7,35	1,73	1,72	5,78	2,89	5,65	0,88	1,44	2,55	1,3	0,64
89,2	7,76	2,88	9,95	1,79	1,17	8,07	2,74	9,30	1,32	1,22	2,64	1,8	0,4

Напряжение конденсаторной батареи

Напряжение конденсаторной батареи равно напряжению фазы q. В уравновешенном режиме напряжение конденсаторной батареи определяется соотношением (401).

Для двигателя с симметричными обмотками $U_c = 0{,}707\,U$. Для двигателя с $\lambda_q = {}^2/_3$ $U_c = 0{,}866\,U$.

При работе двигателя с токами фаз, равными номинальному, напряжение конденсаторной батареи можно принять $U_c = 0{,}9\,U$. На холостом ходу напряжение конденсаторной батареи при рабочей емкости повышается до значений $U_c = U$. При пусковой емкости напряжение конденсаторной батареи зависит от величины емкости и скорости. При $C_п = (4—6)\,C_р$ во время пуска напряжение конденсаторной батареи повышается до значений $U_c = (1{,}2—1{,}25)\,U$.

В конце пуска иногда наблюдаются и несколько большие напряжения конденсаторной батареи, например в двигателе МА 142-$^1/_8$ при пусковой емкости, превышающей рабочую в 2,85 раза. Однако такие повышения напряжения кратковременные. Режим холостого хода двигателя с включенной пусковой емкостью недопустим как для сети, так и для двигателя. Поэтому при использовании трехфазных двигателей напряжением 220 *в* в однофазной сети на 440 *в* конденсаторы должны долго выдерживать напряжение $U_c = U = 440$ *в* и допускать кратковременное повышение до $U_c = 1{,}25$ $U = 550$ *в*.

На рис. 87 приведены осциллограммы процессов пуска и отключения двигателя АОЛ 31-4М при трех значениях емкости конденсатора. Из рис. 87 видно, что конденсаторная батарея не подвергается перенапряжениям, которые имели место при выключении двигателя с параллельно соединенными обмотками. Максимальное напряжение к конденсаторам прикладывается во время холостого хода двигателя.

Расчеты рабочих и пусковых емкостей и пусковых моментов

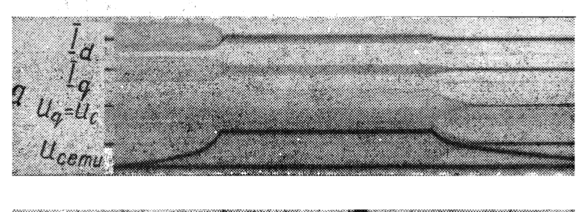
Рассчитаем рабочие и пусковые емкости для двигателя А 42 - 4, для которого $U_{нф} = 220 в$, $I_{нф} = 6{,}1 а$, $\cos\varphi_{q_1} = 0{,}85$, $\sin\varphi_{q_1} = 0{,}526$,

$\sin\varphi_{q_2} = 0{,}898,\ \beta = \frac{I_н}{I_{2-s}} = \frac{1}{5} = 0{,}2,\ Z_{q1N} = \frac{2\cdot 220}{6{,}1} = 72{,}2\ ом,\ k_i = 4.$

Из формулы (420)

$$\frac{x_{cр}}{Z_{q1N}} = \frac{1}{6}\cdot\frac{1+0{,}2^2+4\cdot 0{,}2\cdot\cos(63°53'-31°46')}{0{,}2\,(0{,}898+0{,}577\cdot 0{,}44)+0{,}526-0{,}577\cdot 0{,}85} = 1{,}072,$$

$$x_{cр} = 1{,}072\cdot 72{,}2 = 77{,}4\ ом,\ C_р = \frac{10^6}{314\cdot 77{,}4} = 41{,}2\ мкф.$$



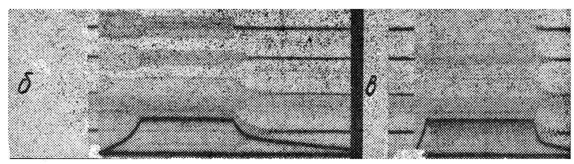


Рис. 87. Осциллограммы включения и отключения двигателя АОЛ 31-4М с последовательно включенными обмотками при $U=360$ *в*: *а* — $C=15{,}3$ *мкф*, *б* — $C=20$ *мкф*, *в* — $C=35{,}2$ *мкф*

Опытным путем найдено значение рабочей емкости $C_р=43{,}5$ ***мкф***. Из соотношения (388) можно определить пусковую емкость

$$C_п = \frac{0{,}9\cdot 4\cdot 6{,}1\cdot 10^6}{314\cdot 220} = 318\ мкф.$$

На рис. 85 и 86 приведены опытные значения пусковых моментов. Определим для этих же емкостей значения пусковых моментов по точным и приближенным формулам. Проводимости фаз d и q при коротком замыкании $y_{qк} = 0{,}0646\ 1/ом$, $y_{dк} = 0{,}132\ 1/ом$, $\cos\varphi_{dк} = \cos\varphi_{qк} = 0{,}49$,

$$\frac{Z_{dк}}{Z_{qк}} = \frac{y_{qк}}{y_{dк}} = \frac{0{,}0646}{0{,}132} = 0{,}49.$$

При $C = 271,\ 2\ мкф,\ \bar{y}_c = \frac{y_c}{y_{qк}} = \frac{314\cdot 271{,}2\cdot 10^{-6}}{0{,}0646} = 1{,}31.$

Подставляя значения $k = \frac{1}{\sqrt{3}}$, $\bar{y}_c$, φ_c, $\cos\varphi_k$ в соотношение (375),

находим

$$\mu_п = \frac{\frac{1}{\sqrt{3}}\left(1+\frac{1}{3}\right)1{,}31\cdot 0{,}49}{(1+0{,}49)^2 - 2\cdot 1{,}31\cdot 0{,}49\cdot 0{,}872\,(0{,}49+1) + 1{,}31^2\ 0{,}49^2} = 0{,}51.$$

Отношение пускового момента при симметричной работе к номинальному моменту $\frac{M_{пн}}{M_н} = 1{,}6$. Поэтому для однофазного двигателя

$$\frac{M_п}{M_н} = \mu_п\,\frac{M_{пн}}{M_н} = 0{,}51\cdot 1{,}6 = 0{,}815.$$

При расчете по приближенному соотношению (384) имеем

$$\mu_п = \frac{3{,}08\cdot 1{,}31\cdot 0{,}49}{9 - 6\cdot 1{,}31\cdot 0{,}872 + 1{,}31^2} = 0{,}513,$$

$$\frac{M_п}{M_н} = 0{,}513\cdot 1{,}6 = 0{,}822.$$

Опытное значение пускового момента (см. рис. 85) $\frac{M_п}{M_н} = 0{,}82$.

При $C = 350$ *мкф* имеем $\bar{y}_c = 1{,}7$. По точному соотношению для пускового момента (375) находим

$$\mu_п = \frac{\frac{1}{\sqrt{3}}\left(1+\frac{1}{3}\right)1{,}7\cdot 0{,}49}{(1+0{,}49)^2 - 2\cdot 1{,}7\cdot 0{,}49\cdot 0{,}872\,(0{,}49+1) + (1{,}7\cdot 0{,}49)^2} = 0{,}86,$$

$$\frac{M_п}{M_н} = 0{,}86\cdot 1{,}6 = 1{,}375.$$

По приближенному соотношению

$$\mu_п = \frac{3{,}08\cdot 1{,}7\cdot 0{,}49}{9 - 6\cdot 1{,}7\cdot 0{,}872 + 1{,}7^2} = 0{,}855$$

$$\frac{M_п}{M_н} = 0{,}855\cdot 1{,}6 = 1{,}37.$$

Опытное значение $\frac{M_п}{M_н} = 1{,}5$ (см. рис.86). Таким образом, для ОКД, полученных из трехфазных, при включении обмоток статора с $\lambda_d = \frac{1}{3}$, $\lambda_q = \frac{2}{3}$ пусковые моменты можно рассчитывать по приближенным соотношениям (384) — (386).

Глава VIII

ОКД С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО СОЕДИНЕННЫМИ ОБМОТКАМИ, ДВУКРАТНО ШУНТИРОВАННЫМИ КОНДЕНСАТОРАМИ

Двигатели с однократно шунтированными обмотками статора недостаточно хорошо используют мощность габарита (70—85%). Это объясняется тем, что в фазе, шунтированной емкостью, вследствие увеличения ширины фазной зоны значительно уменьшается обмоточный коэффициент.

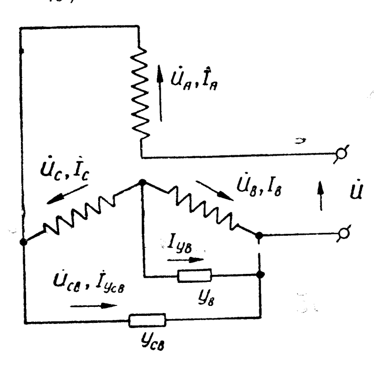


Рис. 88. Схема включения ОКД с последовательно соединенными обмотками статора, двухкратно шунтированными конденсаторами, и обозначения.

Угол сдвига фаз во времени между токами и напряжениями обмоток *d* и *q* двигателя, выполненного по схеме рис. 72, зависит от величины емкости конденсаторов и может быть больше 90°.

В ОКД с двукратно шунтированными обмотками статора сдвиг фаз осуществляется на угол, близкий 120° (рис. 88). Шунтируя конденсаторами обмотку *B*, получаем сдвиг фаз на 120° между токами обмоток *B* и *C*. Шунтируя обе эти обмотки емкостью C_{BC} можно обеспечить сдвиг фаз на такой же угол между токами обмоток *A* и *C*. Три сдвинутые по фазе тока протекают по трем расположенным в пространстве под углами 120° обмоткам, что обеспечивает значительно большую мощность ОКД, чем мощность однофазного двигателя при однократном шунтировании обмотки емкостью.

ОКД с трехфазными последовательно соединенными обмотками статора, двукратно шунтированной конденсаторами, имеют ценные положительные свойства. Изучение их представляет значительный интерес.

Основные уравнения

Если схема соединений, направление токов и напряжений и обозначения будут по рис. 88, то на основе законов Кирхгофа можно написать такие уравнения включения:

$$\dot{U} = \dot{U}_C - \dot{U}_A - \dot{U}_B,$$

$$0 = \dot{I}_A + \dot{I}_C - \dot{I}_{y_{CB}} = \dot{I}_A + \dot{I}_C - y_{CB}\dot{U}_B + y_{CB}\dot{U}_C,$$

$$0 = \dot{I}_B + \dot{I}_{y_B} + \dot{I}_{y_{CB}} - \dot{I}_A = \dot{I}_B - \dot{I}_A + y_B\dot{U}_B + y_{CB}\dot{U}_B - y_{CB}\dot{U}_C,$$

$$\dot{I}_{y_B} = y_B\dot{U}_B, \dot{I}_{y_{CB}} = y_{CB}\dot{U}_{CB}, \dot{U}_{CB} = \dot{U}_B - \dot{U}_C. \quad (456)$$

Принимая обмотки статора двигателя симметричными и применяя метод симметричных составляющих, получаем уравнения разложения на составляющие согласно (1). После подстановки этих составляющих в уравнения включения находим уравнения двигателя

$$\dot{U} = -\dot{U}_0 + 2a\dot{U}_1 + 2a^2\dot{U}_2,$$

$$0 = 2y_0\dot{U}_0 + [(a - a^2)y_{CB} - a^2y_1]\dot{U}_1 + [(a^2 - a)y_{CB} - ay_2]\dot{U}_2, \quad (457)$$

$$0 = (2y_0 + y_B)\dot{U}_0 + [a^2y_B - y_1]\dot{U}_1 + (ay_B - y_2)\dot{U}_2.$$

Решение этих уравнений дает возможность определить симметричные составляющие напряжений нулевой, прямой и обратной последовательностей. При расчетах удобно пользоваться относительными значениями составляющих напряжений.

Напряжение сети равно удвоенному номинальному напряжению фазы

$$U = 2U_{\text{н.ф}}.$$

Комплексы относительных напряжений нулевой, прямой и обратной последовательностей определяются для схемы рис. 88 соотношениями

$$\overline{U}_0 = \frac{2}{a - a^2} \times$$

$$\times \frac{(y_1 + y_2 + y_B)[(a^2 - a)y_{CB} - ay_2] - (a^2y_1 + ay_2)(ay_B - y_2)}{y_1y_2 + (y_1 + y_2)(y_{CB} + y_B + 4y_0) + 4y_0(y_B + y_{CB}) + 3y_By_{CB}}, \quad (458)$$

$$\overline{U}_1 = \frac{2}{a - a^2} \cdot \frac{(2y_0 + y_B)[(a^2 - a)y_{CB} - ay_2] - 2y_0(ay_B - y_2)}{y_1y_2 + (y_1 + y_2)[y_{CB} + y_B + 4y_0) + 4y_0(y_B + y_{CB}) + 3y_By_{CB}}, \quad (459)$$

$$\bar{U}_2 = \frac{2}{a - a^2} \times$$

$$\times \frac{2y_0(a^2 y_B - y_1) - (2y_0 + y_B)[(a - a^2) y_{CB} - a^2 y_1]}{y_1 y_2 + (y_1 + y_2)(y_{CB} + y_B + 4y_0) + 4y_0(y_B + y_{CB}) + 3y_B y_{CB}}. \quad (460)$$

Относительные значения напряжений нулевой, прямой и обратной составляющих — основные величины при расчетах, особенно с использованием круговых диаграмм; они позволяют сделать важные выводы о свойствах схемы.

Пусковой режим

При двукратном шунтировании обмотки статора конденсаторами можно полностью устранить влияния третьей пространственной гармоники на кривую вращающих моментов. При симметричной трехфазной обмотке третью пространственную гармонику могут создавать токи нулевой последовательности. Провалов в кривой моментов от третьей гармоники м. д. с. не будет, если симметричные составляющие нулевой последовательности будут равны нулю или весьма малы.

Уравнение (458) показывает, что при $U_0 = 0$ комплексы параметров двигателя и шунтирующих конденсаторов удовлетворяют соотношению

$$y_{CB} = -\frac{\frac{j}{\sqrt{3}} y_B (y_2 - y_1) + y_1 y_2}{y_1 + y_2 + y_B}. \quad (461)$$

При $n = (0 - 0{,}4) n_c$ проводимости прямой и обратной последовательности мало отличаются от проводимости фазы двигателя при неподвижном роторе

$$y_1 \approx y_2 \approx y_к. \quad (462)$$

Поэтому приближенно

$$y_{CB} = -\frac{y_к^2}{2y_к + y_B}. \quad (463)$$

Принимая, что проводимости имеют индуктивный характер

$$y_к = |y_к| e^{-j\varphi_к}, \; y_B = |y_B| e^{-j\varphi_B}, \; y_{BC} = |y_{BC}| e^{-j\varphi_{BC}},$$

и вводя для простоты относительные значения проводимостей

$$\bar{y}_{BC} = \left| \frac{y_{BC}}{y_к} \right| \text{ и } \bar{y}_B = \left| \frac{y_B}{y_к} \right|,$$

находим после подстановки, преобразования и решения уравнений значения проводимостей, при которых напряжения нулевой последовательности малы, в таком виде:

$$\bar{y}_{BC} = -\frac{\sin(2\varphi_к - \varphi_B - \varphi_{BC})}{2\sin(\varphi_к - \varphi_B)}, \tag{464}$$

$$\bar{y}_B = -\frac{2\sin(\varphi_к - \varphi_{BC})}{\sin(2\varphi_к - \varphi_B - \varphi_{BC})}. \tag{465}$$

Отношение шунтирующих проводимостей

$$\frac{\bar{y}_{BC}}{\bar{y}_B} = \frac{\sin^2(2\varphi_к - \varphi_B - \varphi_{BC})}{4\sin(\varphi_к - \varphi_B)\sin(\varphi_к - \varphi_{BC})}. \tag{466}$$

Когда проводимости y_B и y_{BC} имеют емкостный характер и активными проводимостями можно пренебречь, $\varphi_B = -90°$, $\varphi_{BC} = -90°$.

Модули проводимостей при этом определяются по соотношениям

$$\bar{y}_{BC} = \sin\varphi_к, \tag{467}$$

$$\bar{y}_B = \frac{1}{\sin\varphi_к} = \frac{\bar{y}_{BC}}{\sin^2\varphi_к}. \tag{468}$$

Величины емкостей конденсаторов без потерь

$$C_{BC} = \frac{|y_к|}{\omega}\sin\varphi_к, \tag{467a}$$

$$C_B = \frac{|y_к|}{\omega\sin\varphi_к} = \frac{C_{BC}}{\sin^2\varphi_к}. \tag{468a}$$

Рассматривая частный случай равенства углов $\varphi_B = \varphi_{BC}$, находим

$$\bar{y}_{BC} = -\cos(\varphi_к - \varphi_B), \tag{469}$$

$$\bar{y}_B = -\frac{1}{\cos(\varphi_к - \varphi_B)}. \tag{470}$$

При пассивных проводимостях $\bar{y}_{BC} > 0$ и $\bar{y}_B > 0$. Фазовые углы должны удовлетворять неравенству

$$-\varphi_B = -\varphi_{BC} > \frac{\pi}{2} - \varphi_к.$$

Обычно $\varphi_к = 45 - 60°$, поэтому $-\varphi_B > 30 - 45°$. Такое значение углов φ_B и φ_{BC} легко обеспечить, используя, например, в целях экономии активные сопротивления, шунтирующие пусковые конденсаторы. В этом случае напряжение нулевой последовательности близко к нулю и в кривой моментов не будет провалов.

Наилучшие пусковые характеристики имеют однофазные двигатели, использующие пусковые конденсаторы. Значения пусковых емкостей, определяемых по (467) и (468), большие, а величины пусковых моментов завышенные.

Например, для двигателя А 42-6 при $y_к = 0{,}0695$ 1/*ом*, $\sin \varphi_к = 0{,}848$

$$C_{BC} = \frac{0{,}0695}{314} \cdot 0{,}848 = 0{,}188 \cdot 10^{-3} \text{ ф} = 188 \text{ мкф},$$

$$C_B = \frac{0{,}0695}{314 \cdot 0{,}848} = 0{,}261 \cdot 10^{-3} \text{ ф} = 261 \text{ мкф}.$$

Приведенная на рис. 89 механическая характеристика двигателя при $C_в = 265$ *мкф* и $C_{BC} = 200$ *мкф* (кривая *1*), показывает, что при емкостях, подобранных по соотношениям (467 а) и (468 а), в кривой моментов двигателя нет провалов от третьей пространственной гармоники, а пусковые моменты однофазного двигателя значительно превосходят пусковые моменты двигателя в трехфазном режиме (кривая *4*). Опытные данные (кривые *2, 3*) показывают, что в кривой моментов нет провалов от третьей гармоники при выполнении одного соотношения (468),

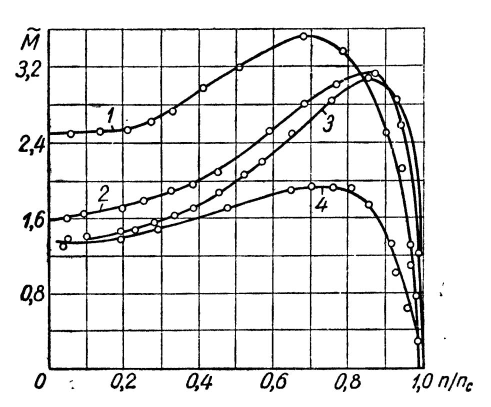


Рис. 89. Механические характеристики двигателя А 42-6.
$P_н = 1{,}7$ *квт*, $M_н = 1{,}78$ *кгм*, $n_с = 1000$ об/мин); *1*—$C_B = 265$ *мкф*, $C_{Bc} = 200$ *мкф*, $U_н = 440$ *в*; *2*—$C_B = 189$ *мкф*, $C_{BC} = 137$ *мкф*, $U_н = 440$ *в*, *3*—$C_B = 140$ *мкф*, $C_{BC} = 100$ *мкф*, $U_н = 440$ *в*, *4*—трехфазное включение, $U_{нф} = 220$ *в*

$$\frac{C_B}{C_{BC}} = \frac{1}{\sin^2 \varphi_к} = 1{,}39,$$

которое может быть удовлетворено при различных значениях емкостей.

Отношение пускового момента двигателя в однофазном режиме к пусковому моменту в трехфазном режиме определяется как разность квадратов модулей напряжений прямой и обратной составляющих

$$\mu_п = \frac{4}{3} \cdot \frac{\left|(2y_0 + y_B)[(a^2 - a)y_{CB} - ay_к] - 2y_0(ay_B - y_к)\right|^2 - \left|2y_0(a^2 y_B - y_к) - (2y_0 + y_B)[(a - a^2)y_{CB} - a^2 y_к]\right|^2}{\left|y_к^2 + 2y_к(y_{CB} + y_B + 4y_0) + 4y_0(y_B + y_{CB}) + 3y_B y_{BC}\right|^2}. \quad (472)$$

Пренебрегая активными проводимостями g_B и g_{BC} шунтирующих конденсаторов, значение пускового момента можно получить в таком виде:

$$\mu_п = \frac{16}{3}\cdot\frac{\alpha_3 \bar{b}_B^2 \bar{b}_{CB} - \alpha_2 \bar{b}_B b_{CB} + \alpha_1 b_{CB} + \alpha_0 b_B}{[\beta_0 + \beta_1(\bar{b}_{CB} + \bar{b}_B) - 3\bar{b}_B \bar{b}_{CB}]^2 + [\gamma_1(\bar{b}_B + \bar{b}_{CB}) - \gamma_0]^2} \qquad (473)$$

Коэффициенты уравнения (473) определяются через параметры двигателя по соотношениям

$$\alpha_0 = \sqrt{3}\,\bar{y}_0 \cos\varphi_0 + 2\sqrt{3}\,\bar{y}_0^2 \cos\varphi_к,$$

$$\alpha_1 = 6\sqrt{3}\,\bar{y}_0^2 \cos\varphi_к,$$

$$\alpha_2 = 2\sqrt{3}\,\bar{y}_0 (2\cos\varphi_к \sin\varphi_0 + \cos\varphi_0 \sin\varphi_к),$$

$$\alpha_3 = \sqrt{3}\left(\bar{y}_0 \cos\varphi_0 + \frac{1}{2}\cos\varphi_к\right),$$

$$\beta_0 = \cos^2\varphi_к - \sin^2\varphi_к + 8\bar{y}_0 \cos(\varphi_к + \varphi_0),$$

$$\beta_1 = 4\bar{y}_0 \sin\varphi_0 + 2\sin\varphi_к,$$

$$\gamma_0 = 8\bar{y}_0 \sin(\varphi_к + \varphi_0) + \sin 2\varphi_к,$$

$$\gamma_1 = 2\cos\varphi_к + 4\bar{y}_0 \cos\varphi_0.$$

При этом вводятся обозначения $\bar{y}_0 = \left|\frac{y_0}{y_к}\right|$, $\bar{b}_B = \frac{b^B}{|y_к|}$, $b_{BC} = \frac{b_{BC}}{|y_к|}$, а φ_0 и $\varphi_к$ — фазовые углы проводимостей нулевой последовательности и короткого замыкания двигателя.

Для двигателя А 42-6 коэффициенты α, β и γ равны $\alpha_0 = 3{,}44$, $\alpha_1 = 7{,}65$, $\alpha_2 = 5{,}41$, $\alpha_3 = 1{,}34$, $\beta_0 = -5{,}51$, $\beta_1 = 5{,}95$, $\gamma_0 = 8{,}85$, $\gamma_1 = 3{,}09$, $\bar{y}_0 = 1{,}18$, $\cos\varphi_0 = 0{,}43$, $y_к = 0{,}0695$ 1/*ом*, $\cos\varphi_к = 0{,}53$.

При $C_B = 265$ *мкф* и $C_{BC} = 200$ *мкф* ($\bar{b}_B = 1{,}2$, $\bar{b}_{BC} = 0{,}903$)

$$\mu_п = \frac{16}{3}\cdot\frac{1{,}34\cdot 1{,}2^2\cdot 0{,}903 - 5{,}41\cdot 1{,}2\cdot 0{,}903 +}{[-5{,}51 + 5{,}95\,(1{,}2 + 0{,}903) - 3\cdot 1{,}2\cdot 0{,}903]^2 +} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{+\,7{,}65\cdot 0{,}903 + 3{,}44\cdot 1{,}2}{+\,[3{,}09\,(1{,}2 + 0{,}903) - 8{,}85]^2} = 1{,}87.$$

Опытные данные (см. рис. 89, кривая *1*) $\mu_п = \frac{2{,}52}{1{,}36} = 1{,}85$.

Расчеты пусковых моментов по (473) показывают, что при включении в сеть двигатель вращается в сторону поля прямой последовательности. Реверсирование двигателя наиболее просто осуществить переключением концов фаз *B* и *C*.

На рис. 90 приведена зависимость от емкости пускового момента однофазного двигателя с двукратным шунтированием обмотки конденсаторами при $\bar{b}_{CB} = \bar{b}\sin^2\varphi_к$, $\bar{y}_0 = 1{,}18$, $\cos\varphi_0 = 0{,}43$, $\cos\varphi_к = 0{,}53$ (кривая *1*).

Максимальное значение пускового момента двигателя в однофазном режиме в 1,7 раза больше, чем при симметричной

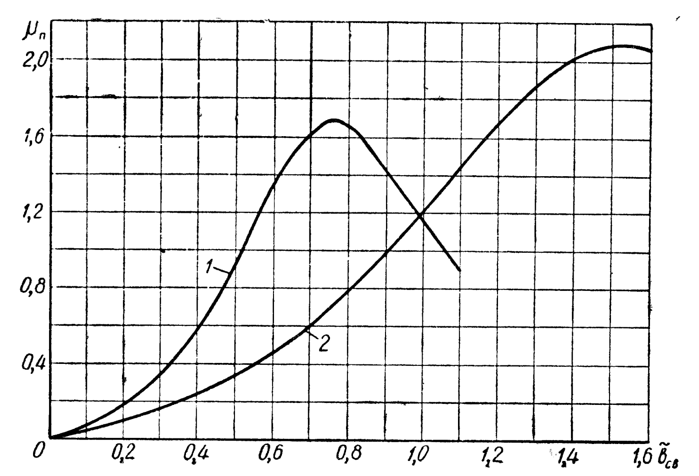


Рис. 90. Зависимость пускового момента от емкости конденсаторов при

$Y_0=1{,}18$, $\cos\varphi_0=0{,}43$, $\cos\varphi_п=0{,}53 b_B$: *1* — $b_B = \frac{bCB}{\sin^2\varphi_K}$; *2* — $b_B=0$

работе, достигается в том случае, когда проводимость b_B близка к проводимости фазы двигателя при коротком замыкании. Для получения $\mu_п = 1$ проводимость конденсаторной батареи b_B должна составлять 0,7 — 0,8 проводимости фазы $y_к$.

При пуске двигателя с использованием одной шунтирующей емкости, например, b_{CB} относительное значение пускового момента записывается в таком виде:

$$\mu_п = \frac{16}{3} \cdot \frac{\alpha_1 \bar{b}_{CB}}{[\beta_0 + \beta_1 \bar{b}_{CB}]^2 + [\gamma_1 \bar{b}_{CB} - \gamma_0]^2}. \qquad (474)$$

Расчеты пусковых моментов, проведенные для тех же значений параметров, показывают, что при однократном шунтировании обмотки статора конденсаторами максимальное значение пускового момента больше, чем при двукратном шунтировании. Однако для получения его необходимо приблизительно в два раза увеличить емкость конденсаторов, шунтирующих две последовательно включенные фазы (рис. 90, кривая *2*).

При малых емкостях пусковые моменты двигателя при двукратном шунтировании обмотки больше, чем при однократном,

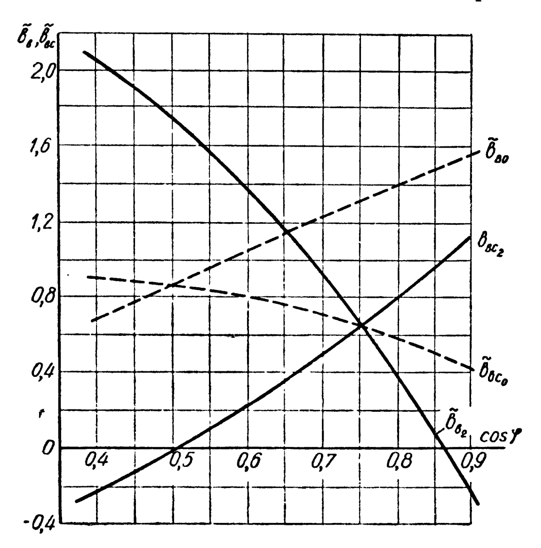


Рис. 91. Относительное значение проводимостей конденсаторов рабочего режима в функции коэффициента мощности двигателя: 1—при $\bar{U}_0 \approx 0$; 2—при $\bar{U}_0 \approx 0$.

однако рабочая емкость C_{BC} значительно меньше, чем при однократном шунтировании. Поэтому при рабочих емкостях пусковой момент составляет 10—20% номинального. Рабочая емкость C_B в 2—2,3 раза больше рабочей емкости C_{BC}. Переключение емкости C_B на время пуска параллельно C_{BC} позволяет увеличить пусковой момент в 2—2,5 раза и в некоторых случаях — отказаться от специальных пусковых конденсаторов.

Режим нормальной работы

При номинальной скорости вращения двигателя, как и при пусковом режиме, напряжение нулевой последовательности должно быть минимальным. При $\bar{U}_0=0$ параметры конденсаторов определяются соотношением (461). При номинальной скорости вращения $y_1 \ll y_2$, $y_1+y_B \ll y_2$. Поэтому, записав соотношение (461). в виде

$$y_1 + y_{CB}\left(1+\frac{y_1+y_B}{y_2}\right)+\frac{jy_B}{\sqrt{3}}\left(1-\frac{y_1}{y_2}\right)=0, \qquad (475)$$

можно пренебречь членами $\dfrac{y_1+y_B}{y_2}$ и $\dfrac{y_1}{y_2}$ и получить простые соотно-

шения для проводимостей конденсаторных батарей, при которых напряжения нулевой последовательности малы,

$$\bar{b}_{B0} = \frac{\bar{b}_{B0}}{|y_1|} = \sqrt{3}\cos\varphi_1, \tag{476}$$

$$\bar{b}_{BC0} = \frac{b_{BC0}}{|y_1|} = \sin\varphi_1. \tag{477}$$

При этом активными потерями в конденсаторах пренебрегаем. На рис. 91 пунктирными линиями показаны значения проводимостей в функции коэффициента мощности двигателя.

Токи нулевой последовательности в трехфазных двигателях создают третьи пространственные гармоники, влияние которых на характеристики двигателя в рабочем режиме сравнительно невелико. Токи обратной последовательности создают поля основной гармоники. Их влияние на характеристики двигателя более существенно.

Параметры конденсаторных батарей необходимо выбирать такими, чтобы напряжение и ток обратной последовательности были минимальными.

Принимая $U_2 = 0$, находим уравнение

$$y_1 + \frac{1-a^2}{3}\left(1+\frac{y_1}{2y_0}\right)y_B - a^2\left(1+\frac{y_B}{2y_0}\right)y_{CB} = 0. \tag{478}$$

При номинальной скорости и рабочих емкостях $y_0 \gg y_1$ и $y_0 \gg y_B$. Пренебрегая малыми по сравнению с единицей величинами и принимая $y_B = jb_B$ и $y_{BC} = jb_{BC}$, находим приближенные значения проводимостей конденсаторов, при которых напряжения обратной последовательности минимальны

$$\bar{b}_{B2} = \frac{b_{B2}}{|y_1|} = 3\sin\varphi_1 - \sqrt{3}\cos\varphi_1, \tag{479}$$

$$\bar{b}_{BC2} = \frac{b_{BC2}}{|y_1|} = \sqrt{3}\cos\varphi_1 - \sin\varphi_1. \tag{480}$$

Соотношения (479) и (480) представлены на рис. 91 сплошными линиями. При увеличении коэффициента мощности двигателя емкость C_B, шунтирующая одну фазу, уменьшается, в то время как емкость C_{BC} увеличивается. Рассматривая двигатель с каким-либо коэффициентом мощности, можно видеть, что емкости конденсаторов, выбираемые из условий минимального напряжения нулевой или же обратной последовательности, существенно отличаются. Практически необходимо выбирать значения емкости конденсаторных батарей из условий минимума U_2 (см. рис. 90, сплошные линии), хотя двигатель при этом работает в неуравновешенном режиме.

Опыты показывают, что можно найти ряд значений емкостей, при которых токи фаз равны номинальному при максимально возможной нагрузке на валу двигателя. Однако аналитиче-

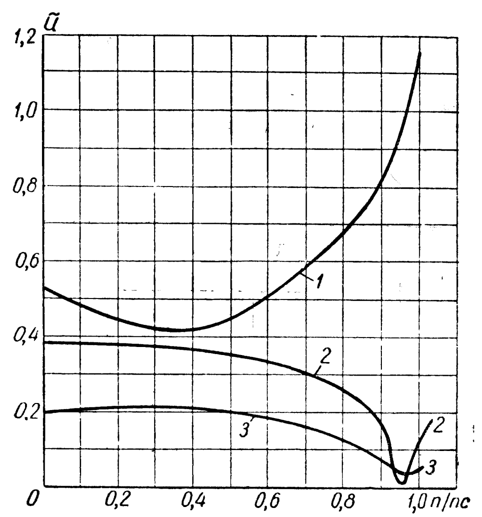


Рис. 92. Симметричные составляющие напряжений в функции скорости вращения двигателя А 41-6 при

$C_B = 32$ *мкф*, $C_{BC} = 16$ *мкф*:

1—$\bar{U}_1$; 2—$\bar{U}_2$; 3—$\bar{U}_0$.

ское определение этого ряда емкостей связано со значительными трудностями.

Сравнение опытных и расчетных данных емкостей показывает возможность применения приближенного решения задачи. Например, для А 41-6 имеем $\bar{b}_{BC} = 0{,}794$ (по расчету 0,83) и $\bar{b}_B = 0{,}498$ (по расчету 0,55).

На рис. 92 приведено изменение напряжений U_0, U_1, и U_2 от скорости двигателя А 41-6 при подобранных опытным путем шунтирующих емкостях $C_B = 32$ *мкф* и $C_{BC} = 16$ *мкф*.

При номинальной скорости вращения напряжения нулевой и обратной последовательности малы ($u_0 = 3\%$, $u_2 = 1{,}5\%$), напряжение прямой последовательности близко к номинальному ($u_1 = 95\%$).

Если принять, что напряжение на емкости C_B равно фазному напряжению двигателя, а на емкости C_{BC} —линейному напряжению двигателя в трехфазном режиме, то суммарная мощность конденсаторной батареи определяется соотношением

$$\frac{P_к}{P_н} = \frac{\bar{b}_{B_2} + 3\bar{b}_{CB_2}}{3\eta\cos\varphi_1} = \frac{3\sin\varphi_1 - \sqrt{3}\cos\varphi_1 + 3(\sqrt{3}\cos\varphi_1 - \sin\varphi_1)}{3\eta\cos\varphi_1} = \frac{2}{\sqrt{3}\eta}, \quad (481)$$

из которого следует, что в первом приближении мощность конденсаторных батарей в вольт-амперах на 15% больше мощности, потребляемой двигателем из сети при номинальном режиме.

В действительности напряжения на конденсаторах при правильно подобранных емкостях меньше фазного и линейного. Мощность двигателя в однофазном режиме при двукратном шунтировании равна 90—93% мощности двигателя в трехфазном режиме (табл. 20).

Таблица 20

Тип двигателя	Трехфазный режим		Однофазный двигатель с двукратным шунтированием							
	$P_Н$, *квт*	$\cos\varphi$	$\frac{P_2}{P_Н}$	$\cos\varphi$	C_B, *мкф*	U_B, *в*	C_{BC}, *мкф*	U_{BC}, *в*	$P_К$, *ва*	$\frac{P_К}{P_2}$
А 42-6	1,7	0,75	0,91	0,98	52	203	22,6	359	1590	1,025
А 41-6	1,0	0,72	0,90	0,99	32	202	16	354	1040	1,16
А 41-4	1,7	0,82	0,935	1,0	45,8	202	18	354	1400	0,88

Отношение мощности конденсаторной батареи к полезной мощности на валу двигателя зависит от cosφ. Чем выше коэффициент мощности двигателя, тем меньше это отношение. При этом ток в фазе *А* по сравнению с токами фаз *В* и *С* возрастает. В ряде случаев может оказаться целесообразным применение шунтирующего фазу *А* индуктивного сопротивления. Применение индуктивности наряду с двумя шунтирующими емкостями может улучшить рабочие характеристики и повысить на несколько процентов мощность двигателя в однофазном режиме.

При однократном шунтировании обмотки статора мощность двигателя составляет 70—85% мощности двигателя в трехфазном режиме. Отношение мощности конденсаторной батареи в вольт-амперах к мощности двигателя в ваттах изменяется в широких пределах и в большинстве случаев оказывается больше, чем при двукратном шунтировании (табл. 21).

Таблица 21

Тип двигателя	Трехфазный режим		Однофазный двигатель с однократным шунтированием					
	$P_Н$, *квт*	$\cos\varphi$	$\frac{P_2}{P_Н}$	$\cos\varphi$	C, *мкф*	U_{BC}, *в*	$P_К$, *ва*	$\frac{P_К}{P_2}$
АОЛ31-4 М	0,6	0,77	0,72	0,92	20	387	945	2,12
А 41-6	1,0	0,72	0,70	0,93	36,9	409	1940	2,77
МА 142-1/8	2,7	0,7	0,80	0,87	104,3	396	5150	2,38
А42-4-1	2,8	0,85	0,80	0,99	43,4	356	1720	0,767

В ОКД с симметричными двухфазными обмотками мощность конденсаторной батареи равна активной мощности, потребляемой двигателем из сети. При несимметричной обмотке мощность конденсаторной батареи увеличивается. Отношение $P_к/P_2$ зависит также от коэффициента мощности и коэффициента использования мощности габарита $\frac{P_2}{P_н}$. В однофазных двигателях без конденсаторов $P_к/P_2=0$. При этом $P_2/P_н=0,5—0,7$.

Из приведенного можно заключить, что чем выше коэффициент мощности двигателя в трехфазном режиме, тем меньше требуемая мощность конденсаторов в однофазном режиме и тем выше коэффициент использования мощности габарита.

Данные опытов и кривые (см. рис. 91) показывают, что при $\cos\varphi=0,6—0,83$ целесообразно использовать схему с двукратным шунтированием. При $\cos\varphi>0,83$, по-видимому, может быть целесообразной схема с однократным шунтированием.

Приведенные в табл. 20 данные показывают, что для однофазных двигателей с двукратно шунтированной обмоткой статора в рабочем режиме требуемая мощность конденсаторной батареи меньше, чем в известных экономичных схемах ОКД, например при соединении в звезду или в треугольник с двумя реактивными сопротивлениями (L и C), при которых коэффициент использования мощности габарита достигает 100% или в однофазных двигателях с двухфазной симметричной обмоткой.

В приведенных примерах рабочие емкости подобраны опытным путем из условия равенства токов фаз номинальному току при максимальной допустимой нагрузке на валу двигателя.

Рабочие, механические и токовые характеристики

Подробное исследование рабочих, механических и токовых характеристик ОКД при двукратном шунтировании проведено на двигателях типа А 41-6 и А 41-4.

Каждый двигатель испытывался в трехфазном и однофазном режимах. При работе в качестве ОКД определялись характеристики при рабочих и при пусковых емкостях. Некоторые результаты испытаний сведены в табл. 21, представляющую сравнительные данные двигателей в трехфазном и однофазном включении при двукратном шунтировании обмотки статора конденсаторами. Более подробные данные двигателя А 41-4 приведены в виде графиков на рис. 93, 94, 95.

При включении двигателя А 41-6 на трехфазную сеть опытные значения к. п. д. и коэффициента мощности (приводятся в скобках в табл. 22) мало отличаются от данных каталога.

В рабочем режиме до опрокидывающего момента характеристики определены при номинальном напряжении сети. В пусковом режиме характеристики сняты при напряжении, пониженном в два раза относительно номинального. Поэтому

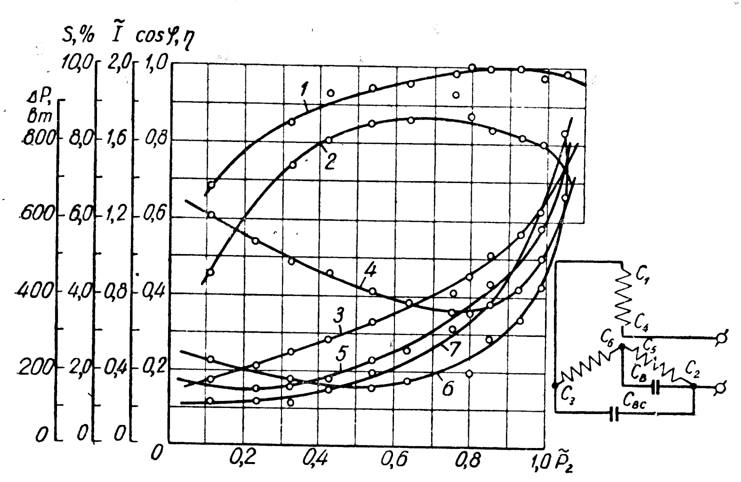


Рис. 93. Рабочие характеристики двигателя А 41-4 при последовательном соединении обмоток, двукратно шунтированных емкостью

$C_B = 45{,}8$ *мкф*, $C_{BC} = 18$ *мкф*, $U_н = 440$ *в*, $I_н = 3{,}9$ *а*, $P_н = 1{,}7$ *квт*:

1 — $\cos\varphi$; 2 — η; 3 — $I_{C_1C_4}$; 4 — $\tilde{I}_{C_2C_5}$; 5 — $\tilde{I}_{C_3C_6}$; 6 — ΔP; 7 — s.

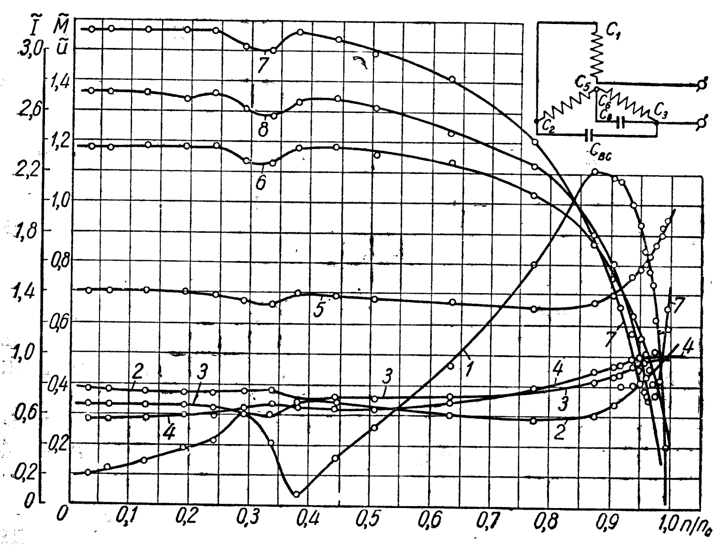


Рис. 94. Характеристики двигателя А 41-4 при последовательном соединении обмоток, двукратно шунтированных емкостью $C_B = 45{,}8$ *мкф*, $C_{BC} = 18$ *мкф*, $U_н = 440$ *в*, $I_н = 3{,}9$ *а*, $P_н = 1{,}7$ *квт*, $M_н = 1{,}17$ *кгм*.

1 — $\tilde{M}$; 2 — $\tilde{U}_{C_2C_5}$; 3 — $\tilde{U}_{C_3C_6}$; 4 — $\tilde{U}_{C_1C_4}$; 5 — $\tilde{U}_{C_2C_5}$; 6 — $\tilde{I}_{C_1C_4}$; 7 — $I_{C_2C_5}$; 8 — $\tilde{I}_{C_3C_6}$.

опытные значения пусковых тока и момента меньше, чем указано в каталоге. Коэффициент мощности двигателя при неподвижном роторе $\cos\varphi_к = 0{,}58$.

В режиме ОКД при рабочих емкостях перегрузочный момент равен 0,972 номинального момента двигателя в трехфазном режиме. При номинальном моменте, равном 0,9, перегрузочный момент двигателя с двукратно шунтированной обмоткой статора

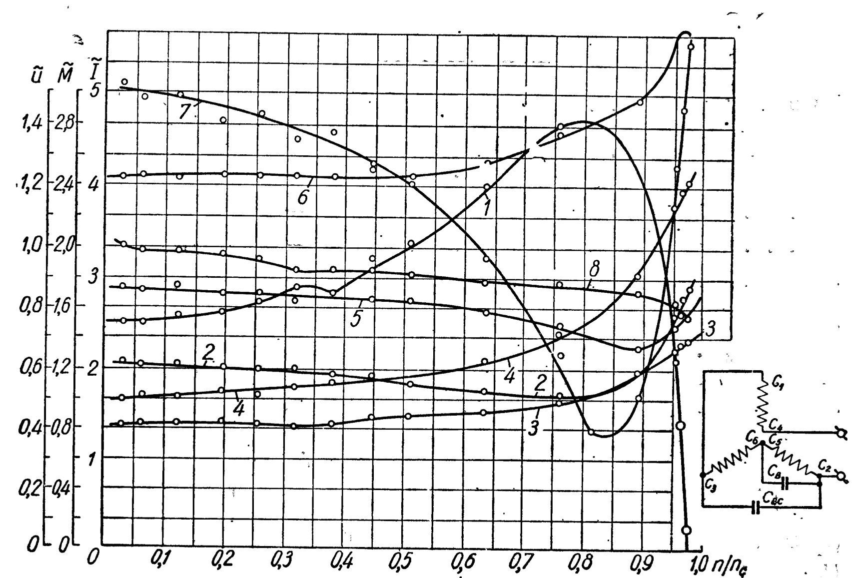


Рис. 95. Характеристики двигателя А 41-4 при последовательном соединении обмоток, двукратно шунтированных емкостью, $C_{BC} = 110$ *мкф*, $C_B = 220$ *мкф*, $U_н = 440$ *в*, $I_н = 3{,}9$ *а*, $P_н = 1{,}7$ *квт*, $M_н = 1{,}17$ *кгм*:
1—$\tilde{M}$; 2—$U_{C_2C_5}$; 3—$U_{C_3C_6}$, 4—$U_{C_1C_4}$; 5—$U_{C_2C_3}$, 6—$I_{C_1C_4}$, 7—$I_{C_2C_5}$; 8—$I_{C_3C_6}$.

равен 1,1. Пусковой момент двигателя равен 0,15 номинального момента двигателя в трехфазном режиме, или 0,17 номинального момента в однофазном режиме.

Значение $\frac{1}{\sin^2\varphi_к} = \frac{1}{0{,}814^2} = 1{,}5$. Отношение рабочих емкостей $\frac{C_B}{C_{BC}} = \frac{32}{16} = 2$. Отношение пусковых емкостей $\frac{C_B}{C_{BC}} = \frac{148}{60} = 2{,}47$. Однако пусковой момент одновременно является и минимальным, третья пространственная гармоника проявляется слабо.

Пусковой момент при $C_{BC} = 60$ и $C_B = 148$ *мкф* равен 1,4, а максимальный момент—2,45. Кратность пускового тока несколько больше, чем при трехфазном включении.

При мощности на валу двигателя $P_2 = 0{,}9\ P_н$ ток в нешунтированной фазе A равен номинальному, а в шунтированной конденсаторами дважды фазе B — на 3% больше номинального.

Параметр	А 41-6		
	Симметричная работа	C_{BC}=16 *мкф*, C_B=32 *мкф*	C_{BC}=60 *мкф*, C_B=148 *мкф*
Напряжение сети	220	440	440
Номинальная мощность, *квт*	1,0	—	—
Номинальный ток, *а*	2,8	2,8	2,8
Коэффициент использования $P_2/P_н$	—	0,90	—
$\bar{I}\ A$	—	1,0	—
$\bar{I}\ B$	—	1,03	—
$\bar{I}\ C$	—	0,96	—
К. п. д.	0,77 (0,75)	0,73	—
cosφ	0,72 (0,73)	0,99	—
$M_{max}/M_{ном}$	1,9 (1,9)	0,972	2,45
$M_{пус}/M_{ном}$	1,5 (1,2)	0,155	1,4
$M_{min}/M_{ном}$	(1,2)	0,155	1,4
$I_{пус}/I_{ном}$	4 (3,25)	1,75	3,57
S, %, при P_2	7 (6)	6	—
$U_B/U_н$ при P_2		0,459	0,78
$U_{CB}/U_н$ при P_2		0,805	0,78
$U_B/U_н$ при $P_2=0$		0,495	0,8
$U_{CB}/U_н$ при $P_2=0$		0,955	0,84
$P_К$ при P_2		1040	
$P_К/P_2$ при P_2		1,16	
Номинальное напряжение конденсаторов C_B		260	260
Номинальное напряжение конденсаторов C_{BC}		450	450
$M_н$, *кгм*	1,05	1,05	1,05

Ток в фазе C на 4% меньше номинального. При уменьшении нагрузки на валу двигателя токи фаз A и C уменьшаются. Ток в фазе B при уменьшении мощности с 0,9 до 0,75 номинальной также уменьшается. При большем уменьшении мощности ток в фазе B увеличивается, достигая значений 1,4 $I_н$. Однако суммарные потери в асинхронном двигателе меньше потерь при номинальной нагрузке.

Для двигателя А 41-6 при паспортном значении $\eta=0{,}77$ номинальные потери $\Delta p=300$ *вт*.

Коэффициент мощности при нагрузке $P_2=0{,}9$ составляет 0,99. При уменьшении нагрузки до 0,2 коэффициент мощности становится опережающим и равен 0,93.

Для двигателя А 42-6 мощностью 1,7 *квт* при емкостях $C_B=52$ *мкф* и $C_{BC}=22{,}6$ *мкф* двигатель может нести полезную

Таблица 22

А 42-6				А 41-4		
Симметричная работа	C_{BC}=22,6 *мкф*, C_B=52 *мкф*	C_{BC}=137 *мкф*, C_B=189 *мкф*	C_{BC}=200 *мкф*, C_{BC}=265 *мкф*	Симметричная работа	C_{BC}=18 *мкф*, C_B=458 *мкф*	C_{BC}=110 *мкф*, C_B = 220*мкф*
220	440	440	440	220	440	440
1,7	—	—	—	1,7		
4,3	4,3	4,3	4,3	3,9	3,9	3,9
—	0,91	—	—		0,935	
—	1,01	—	—		1,13	
—	1,03	—	—		0,85	
—	0,94	—	—		1,0	
0,795 (0,74)	0,81	—	—	0,815 (0,85)	0,81	
0,75 (0,74)	0,98	—	—	0,83 (0,825)	1,0	
1,9 (1,9)	1,06	3,12	3,5	2,0 (2,16)	1,1	2,85
1,6 (1,4)	0,15	1,58	2,52	1,7 (1,46)	0,1	1,5
(1,4)	0,13	1,58	2,52	(1,4)	0,03	1,5
4,5 (3,57)	2,0	3,9	6,3	5,5 (4,1)	2,36	4,1
7 (6,25)	6	—	—	5,35 (4,5)	5,1	
	0,462	0,95	0,80		0,459	0,83
	0,817	1,04	0,7		0,805	0,77
	0,6	1,0	0,85		0,6	0,865
	0,952	1,1	0,75		0,95	0,79
	1590				1400	
	1,025				0,88	
	260	260	260		260	260
	450	450	450		450	450
1,78	1,78	1,78	1,78	1,17	1,17	1,17

нагрузку, равную 91% номинальной мощности двигателя. При этом ток фазы B больше номинального на 3% и при уменьшении нагрузки с 0,8 до 0 увеличивается до 1,5 номинального.

Максимальный момент равен 1,06 номинального в трехфазном режиме. Перегрузочный момент составляет 1,16 номинального в однофазном режиме. Максимальные моменты, при емкостях больше рабочих в пять—семь раз, достигают значений 3,12—3,5, а пусковые моменты — 1,58—2,52.

Пусковой момент является минимальным, третьи пространственные гармоники не проявляются.

Аналогичные результаты получаем для двигателя А 41-4, для которого максимальный момент при рабочей емкости больше рабочего на 19%, а при пусковой емкости максимальный момент больше номинального в три раза (см. 93, 95).

Такие резкие изменения максимального момента обусловливают большие ускорения и, следовательно, нежелательны. Двигатель А 41-4 имеет высокий коэффициент мощности в рабочем режиме при трехфазной работе и номинальной нагрузке.

При токах фаз, близких к номинальному, двигатель может быть нагружен на 93,5% против 90% для двигателей с более низким коэффициентом мощности.

Однако неравномерность нагрузки фаз увеличивается. В частности ток в фазе *А* больше номинального на 13%, в то время, как ток фазы *В* меньше номинального на 15%. При идеальном холостом ходе ток фазы *А* в 1,5 раза больше номинального.

Испытания двигателя А 41-4 показывают, что в однофазном режиме к. п. д. двигателя понижается. Установить величину уменьшения к. п. д. опытным путем не представляется возможным из-за несоответствия температурных условий, о чем свидетельствуют значения скольжений в режиме номинальных токов. По-видимому, уменьшение к. п. д. двигателя в однофазном режиме составит около 3%. Более точные данные могут быть получены расчетным путем.

Как показывают кривые на рис. 93, 94, 95, в однофазном режиме к. п. д. двигателя мало изменяется при уменьшении нагрузки до половинной. При этом ток фазы, дважды шунтированной конденсаторами, близок к номинальному. Токи двух других фаз уменьшаются приблизительно пропорционально мощности нагрузки. Поэтому ОКД с двукратно шунтированными обмотками статора могут хорошо работать при нагрузке от половинной до номинальной. Область половинной нагрузки на рабочих характеристиках соответствует минимуму суммарных потерь в двигателе.

Напряжения конденсаторных батарей

Как это видно из данных экспериментов, напряжения на конденсаторных батареях зависят от величины емкости, скорости вращения двигателя и параметров обмоток двигателя.

Номинальное напряжение конденсаторной батареи, шунтирующей одну фазу, должно составлять 0,5 напряжения сети. При номинальной нагрузке однофазного двигателя это условие удовлетворяется. Для двигателей А 41-6 и А 41-4 при нагрузке $P_2=0{,}9$ и $P_2=0{,}935$ напряжение меньше фазного напряжения двигателя, $U_B=0{,}459$. Для двигателя А 42-6 при $P_2=0{,}91$ напряжение $U_B=0{,}462$. При уменьшении нагрузки напряжение конденсаторной батареи C_B увеличивается до 0,6. При включенных пусковых емкостях напряжение конденсаторной батареи C_B увеличивается до значений $U_B=0{,}7$ при неподвижном роторе и до $U_B=1$ на холостом ходу. Однако при увеличении скорости от $n=0$ до $n=0{,}8$—$0{,}85$ напряжение U_B уменьшается, достигая значений $U_B=0{,}6$.

Конденсаторы типа МБГЧ выдерживают воздействие напряжения переменного тока, равного 110% номинального, а устройства для автоматического управления пуском ОКД отключают пусковую емкость при скорости 0,8—0,9 синхронной, поэтому номинальное напряжение конденсаторов $C_В$ может быть выбрано из условий длительной работы на холостом ходу при рабочей емкости

$$U_{к.в.н} = (1,1 - 1,2)\, U_{н.ф} = (1,1 - 1,2)\, 220 \approx 260 \text{ в}.$$

Номинальное напряжение конденсаторной батареи, шунтирующей две последовательно включенные фазы, должно быть, если бы был уравновешенный режим, в $\sqrt{3}$ раз больше номинального напряжения фазы, или $U_{с.в} = \frac{\sqrt{3}}{2} = 0,865$ напряжения сети.

При номинальной нагрузке и рабочих емкостях действительное напряжение конденсаторной батареи $C_{ВС}$ несколько меньше этого значения и $U_{с.в.} = 0,805—0,817\ U_{сети}$.

На холостом ходу двигателя напряжение конденсаторной батареи $U_{с.в.}$ повышается примерно на 20% по сравнению с значением при номинальной нагрузке в однофазном режиме. При рабочей емкости на холостом ходу напряжение $U_{с.в} = (0,95—1,1)\, U_{сети}$.

При пусковых емкостях напряжение $U_{с.в.}$ уменьшается от 0,95 при $n = 0$ до 0,6 при $n = 0,7—0,85$; а при дальнейшем увеличении скорости увеличивается до значений 0,8—0,85. Поэтому номинальное напряжение конденсаторов $C_{ВС}$ определяется из условий длительной работы на холостом ходу

$$U_{к.е.в.н} = 1,2\sqrt{3}\, U_{н.ф} \approx 460 \text{ в}.$$

Глава IX

АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПУСКОМ ОКД

Назначение устройств автоматического управления ОКД

Общая особенность всех схем ОКД заключается в том, что при постоянных значениях емкости и индуктивности, используемых в схеме, уравновешенный режим работы может быть только при одной какой-либо скорости; при других же—магнитное поле в воздушном зазоре машины становится эллиптическим, потери увеличиваются, а движущий момент машины всегда меньше момента прямого поля и определяется как разность моментов прямого и обратного полей.

В процессе разгона двигателя параметры конденсаторной батареи должны непрерывно изменяться. Емкость ее при неподвижном роторе должна быть в пять—семь раз больше рабочей.

Устройства для автоматического управления ОКД должны автоматически изменять величину индуктивности и емкости в функции скорости вращения ротора.

В комбинированных схемах устройства автоматического управления, кроме того, пересоединяют схемы включения или переключают емкости из одной цепи в другую. Устройства для автоматического управления ОКД предназначаются обычно для повышения пускового момента. Однако в некоторых случаях возникает необходимость повысить перегрузочный момент в таких размерах, при которых неравномерность токов фаз находится в допустимых пределах. Устройства автоматического управления могут, кроме всего этого, так регулировать параметры схемы, чтобы двигатель не перегревался на холостом ходу.

Все эти задачи наилучшим образом решаются при плавном регулировании индуктивностей и емкостей при помощи дросселей насыщения.

Последний включается параллельно или последовательно с рабочей емкостью. При последовательном соединении и нена-

сыщенном дросселе вследствие возникающего резонанса напряжений эквивалентную емкость можно повысить в несколько раз. После разгона двигателя дроссель насыщается, емкостное сопротивление увеличивается до значений, при которых возникает уравновешенный режим работы двигателя. Аналогично изменяется емкость при параллельном соединении дросселя.

Устройства с дросселями насыщения требуют значительного увеличения емкости конденсаторной батареи. Габариты, вес и стоимость устройства резко увеличиваются, в связи с чем для массового применения они неприемлемы.

Обычно используются две ступени емкости: рабочая и пусковая. В приводе шахтного конденсаторного электровоза общая емкость разбивается на три ступени: рабочую, перегрузочную и пусковую. Автоматические устройства пуска, используемые в ОКД, предназначаются для отключения в зависимости от скорости перегрузочной и пусковой емкостей.

Автоматическое управление пуском ОКД позволяет использовать в качестве пусковых емкостей малогабаритные электрические конденсаторы, что значительно повышает экономичность однофазных двигателей. Устройства для автоматического управления пуском позволяют также своевременно, до появления резонанса и значительных напряжений на конденсаторах и обмотках, отключить пусковую емкость. Это повышает надежность и срок службы однофазных двигателей. При использовании устройства для автоматического управления пуском операции включения и отключения становятся такими же простыми, как и для трехфазных двигателей с короткозамкнутым ротором. Вследствие этого однофазные двигатели могут быть использованы в схемах автоматизированного электропривода.

Для автоматического отключения пусковой емкости обмотки находят применение реле времени [47], напряжения [43, 50, 92], электромагнитные дифференциальные реле (ДР), тепловые [95] и центробежные.

Номинальная мощность контактов реле

Мощность отключающих контактов определяется мощностью конденсаторной батареи

$$P_к = U_к I_к = U_c^2 \omega C_{в.к} \cdot 10^{-6} \ [ва],$$

где U_c — напряжение на зажимах конденсаторной батареи при $n = 0{,}9\ n_c$; $C_{в.к}$ — отключаемая емкость, *мкф*; $\omega = 314$ — круговая частота.

Напряжение на конденсаторах зависит от величины емкости и скорости. В табл. 23 приведены полученные опытным путем отношения напряжений на зажимах конденсаторов к напряжению в сети для ОКД при различных режимах и схемах. Необходимо учитывать, что реле срабатывает при $n < 0{,}9\, n_c$.

Таблица 23

Величина скольжения s	Емкость	Включение в треугольник с индуктивностью и емкостью	Параллельное включение обмоток ($\lambda_d=1/3$, $\lambda_q=2/3$)	Последовательное включение обмоток ($\lambda_d=1/3$, $\lambda_q=2/3$)
0	$C_п$	1,22	1,75	1,25
	$C_р$	1,22	1,45	0,95
0,1	$C_п$	0,92	1,4	0,9
	$C_р$	0,78	1,2	0,77
1	$C_п$	0,9	1,45	0,9
	$C_р$	0,67	1,2	0,75

В табл. 24 приведены значения необходимых дополнительных емкостей, отключаемого тока и мощности контактов реле для двигателей серии *А*, включаемых в треугольник с индуктивностью и емкостью.

Таблица 24

Параметры	А 31-4	А 32-4	А 41-4	А 41-6	А 42-4
Мощность P, *квт*	0,6	1,0	1,7	1,0	2,8
Номинальное напряжение, $U_н$ *в*	220	220	220	220	220
$C_р$, *мкф*	45,8	69	110	78,3	173
$X_{др}$, *ом*	200	117,5	65	143	39,8
$C_д$, *мкф*	150	200	250	200	300
$P_к$, *ва*	1940	2580	3230	2580	3880
Отключаемый ток, *а*	9,57	12,7	15,9	12,7	17,6

Предельное значение отключаемого тока для контактов реле (а также для вспомогательных контактов контакторов) при напряжении 220 — 500 *в* равно 20 *а*. Максимальный длительно допустимый ток для контактов реле переменного тока и напряжений 220 — 500 *в* равен 20 *а* [76]. Поэтому для маломощных ОКД можно использовать выпускаемые промышленностью реле переменного тока.

В более мощных двигателях необходимо использовать для отключения емкости контакторы переменного тока.

Отключение пусковой емкости или обмотки в функции времени

Из приведенных ранее характеристик видно, что после разгона ОКД пусковая емкость должна быть отключена. Это можно осуществить вручную или автоматически. Для ручного управления используются кнопки с самовозвратом в цепи пусковой обмотки (или емкости).

В специально разработанной для однофазных двигателей мощностью до 1 *квт* кнопке типа ПНВС включение двигателя в сеть и пусковой емкости осуществляется одновременно. Контакты пусковой емкости замкнуты до тех пор, пока нажимается кнопка «пуск». Линейные контакты удерживаются в замкнутом состоянии защелкой.

В двигателях малой мощности пусковая емкость или обмотка может отключаться при помощи реле времени [47]. Выдержка времени реле устанавливается в зависимости от мощности и условия работы двигателя в пределах 0,5—3 сек.

Для отключения пусковой емкости в функции времени могут быть использованы различные реле времени: электромагнитные, маятниковые, моторные, а также одно- и двухобмоточные электромагнитные с полупроводниковыми выпрямителями [87]. Если реле времени используется для непосредственного отключения пусковой емкости или обмотки, то рационально использовать реле, которые имеют нормально закрытый контакт с выдержкой времени при размыкании.

Недостаток схем управления пуском в функции времени — несоответствие регулируемого параметра, так как пусковая емкость должна отключаться в функции скорости. Время, в течение которого будет достигнута скорость $\frac{n}{n_c} = 0{,}7—0{,}9$, зависит от нагрузки на валу двигателя и напряжения сети. Реле времени не учитывает изменившихся условий работы однофазного двигателя.

Отключение пусковой обмотки при помощи центробежного реле и тахогенератора

Наиболее простое автоматическое приспособление, которое могло бы включать и отключать пусковую емкость в функции скорости,— центробежное реле с нормально закрытыми контактами.

В однофазных асинхронных двигателях малой мощности с пусковой обмоткой центробежное реле размещается в корпусе двигателя. Грузик реле прикрепляется к вентиляционным лопастям короткозамыкающего кольца ротора, что позволяет упростить конструкцию реле. Однако центробежное реле имеет некоторые недостатки. Реле плохо настраивается, к нему затруднен доступ, на его работу оказывает влияние осевой люфт ротора. Установка реле приводит к увеличению длины двигателя. Разрывная мощность контактов невелика.

Можно было бы применить для автоматизации пуска однофазного двигателя в функции скорости тахогенератор. При этом включение и отключение пусковой емкости могло бы осуществляться через нормально закрытые контакты реле напряжения, срабатывающего при достижении ротором номинальной

скорости. Это решение сложное. Зависимость напряжений и токов фаз ОКД от скорости позволяет найти такие регулируемые параметры, в функции которых можно осуществить автоматическое управление пуском однофазного двигателя.

Управление пуском однофазных двигателей при помощи реле напряжения

Приведенные ранее опытные пусковые характеристики показывают, что для автоматического управления пуском однофазных двигателей в функции скорости можно найти другие параметры, измерение которых проще.

Д. И. Секретев [43], а также некоторые другие авторы для автоматического управления пуском ОКД с параллельно включенными обмотками используют реле напряжения. Пусковая емкость может быть отключена при помощи реле напряжения также при включении обмоток статора в треугольник, в звезду, при последовательно-параллельном включении обмоток, при одно-, дву- и трехкратном шунтировании обмоток (рис. 96).

Регулируемым параметром является напряжение вспомогательной, включаемой последовательно с конденсаторами, фазы (рис. 96,*а,б*). В схемах ОКД с включением обмоток статора в звезду или треугольник в качестве регулируемого параметра можно использовать напряжение на дросселе (рис. 96,*в,г*). В двигателях с последовательно соединенными обмотками статора реле напряжения включается на зажимы фазы, не шунтированной емкостью (рис. 96, *д, е, з*).

На рис. 97 приводится зависимость напряжения вспомогательной фазы регулируемого параметра (кривая *2*) от скорости вращения двигателя и емкости конденсаторных батарей для трех схем включения ОКД: при последовательно-параллельном включении обмоток, при последовательном включении обмоток статора и двукратном шунтировании и при соединении обмоток в звезду.

Когда емкость меньше резонансной, а скорость меньше синхронной, напряжение вспомогательной фазы увеличивается приблизительно пропорционально емкости конденсаторов и скорости вращения. При рабочей емкости напряжение вспомогательной фазы приблизительно в два раза меньше, чем при пусковой емкости. При последовательно-параллельном включении обмоток это соотношение близко трем.

Если пусковые конденсаторы включаются через нормально закрытые контакты реле, а напряжение срабатывания реле выбрано бóльшим, чем напряжение на реле при неподвижном роторе, то пусковая емкость будет отключена при скорости вращения ротора выше 0,6—0,7. Пусковая емкость обычно отключается при скорости вращения $\frac{n}{n_c}$ =0,8—0,9. При этом напря-

жение вспомогательной фазы уменьшается в два-три раза, коэффициент возврата реле должен быть равным 0,5—0,3.

При использовании реле напряжения с более высоким коэффициентом возврата в цепь обмотки реле включается дополни-

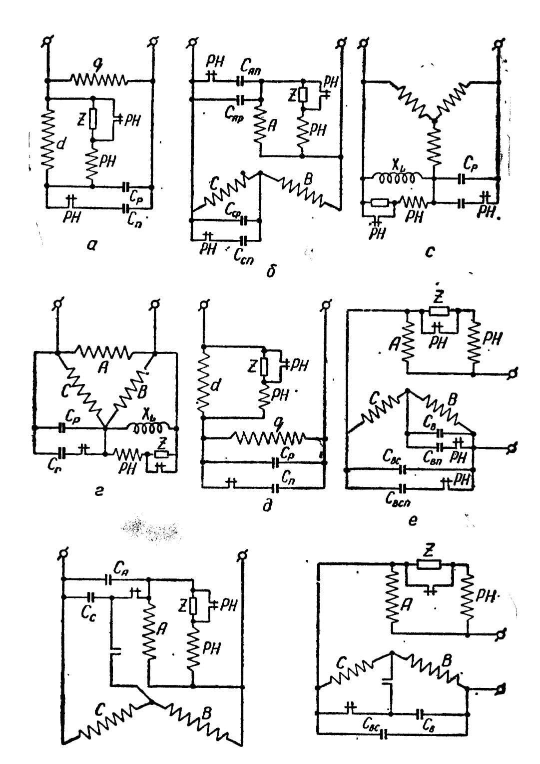


Рис. 96. Схемы управления пуском ОКД при помощи реле напряжения.

тельное сопротивление, шунтируемое нормально открытыми вспомогательными контактами.

При использовании реле с меньшим коэффициентом возврата схема управления малочувствительна к понижению скорости при перегрузке вследствие небольшого изменения напряжения вспомогательной фазы при рабочей емкости.

Для повышения чувствительности может быть использовано дополнительное сопротивление, вводимое в цепь обмотки реле, как показано на рис. 96. Величина этого сопротивления выбирается с учетом допустимых понижений напряжений сети.

Напряжения фаз d и C_2C_5 (при соединении в треугольник) при рабочей емкости изменяются в функции скорости мало. Реле напряжения, особенно в схемах двигателя с последователь-

ным и параллельным включением обмоток,— недостаточно чувствительный элемент для повышения перегрузочной способности однофазных двигателей.

Из выпускаемых нашей промышленностью типов реле для однофазных двигателей, управляемых в функции напряжения, могут быть использованы нулевые реле РЭ2161, промежуточные РПТ-100, ЭП-41Б. Контакты реле Р32161 включают ток до 100 *а*

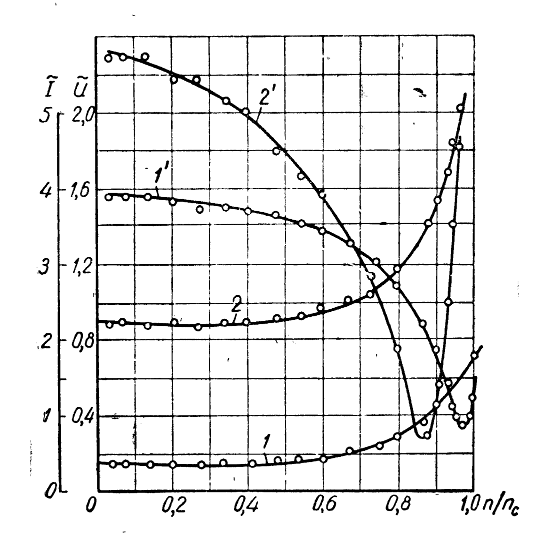


Рис. 97. Зависимость регулируемых параметров от скорости вращения двигателя А 41-4 при последовательно-параллельном включении обмоток:
1, 2—$\bar{U}_{C_1C_4}$; 1' 2'—$\bar{I}_{C_2C_5}$; 1—C_A=28 *мкф*, $C_с$=56,1 *мкф*,; 2—C_A=140,5 *мкф*, C_c=282 *мкф*, $I_н$=3,9*а*; $U_н$= 380*в*.

и отключают 20 *а* при напряжении 500 *в*. Реле выполняется с самовозвратом. Коэффициент возврата не нормируется и может быть от 0,3 до 0,7. Реле РЭ2161 можно использовать для двигателей мощностью 2,8—4,5 *квт*. Для двигателей малой мощности могут быть использованы промежуточные реле.

Управление пуском однофазных двигателей в функции двух регулируемых параметров

Включение дополнительной пусковой емкости, превосходящей рабочую емкость в четыре-пять раз, необходимо далеко не для всех приводов. При малых значениях дополнительной пусковой емкости напряжение вспомогательной обмотки с ростом скорости изменяется мало. Реле напряжения поэтому работает нечетко. Для ОКД с последовательно включенными обмотками

при $\Theta_u^{пр} \neq 90°$ характерно малое изменение напряжения обмотки *d*. При пусковой и рабочей емкости напряжение обмотки *d* равно 0,5—0,6 напряжения сети.

Реле напряжения в данном случае не может быть использовано для отключения пусковой емкости. Необходимо искать новые регулируемые параметры.

Рассмотрим ОКД при включении обмоток статора в треугольник. Для автоматического управления пуском ОКД, выполненных по рассматриваемой схеме, можно было бы использовать ток фазы C_3C_6, шунтируемой конденсаторами. Когда включена только рабочая емкость, ток фазы C_3C_6 больше номинального в 2,8 раза. При включении дополнительной пусковой емкости ток этой фазы увеличивается до $4I_н$. При увеличении скорости ротора до $\frac{n}{n_c}=0{,}88$ ток фазы C_3C_6 равен номинальному. Поэтому, используя максимальное токовое реле, включаемое в фазу C_3C_6, можно было бы осуществить подключение пусковой емкости. Однако одного регулируемого параметра оказывается недостаточно для надежной работы. При пусковой емкости и скорости, близкой к номинальной, двигатель развивает значительные пусковые моменты. Разгон его осуществляется очень быстро. Осциллограммы показывают, что минимум тока фазы C_3C_6 длится два-три периода. При дальнейшем росте скорости ток в фазе C_3C_6 увеличивается. За такое короткое время реле не успевает сработать.

Для более надежной работы реле необходимо ослабить намагничивающее действие обмотки тока такими ампервитками, которые увеличивались бы при росте скорости. Для этой цели рационально воспользоваться напряжением фазы C_2C_5, которое непрерывно увеличивается с ростом скорости. Это позволяет для автоматизации пуска ОКД использовать схему, приведенную на рис. 98, *г*.

Рабочая емкость подключается к зажимам двигателя постоянно. Пусковая емкость присоединяется через нормально открытый контакт ДР. Токовая обмотка этого реле включается в «конденсаторную» фазу. Его обмотка напряжения присоединяется к концам «индуктивной» фазы. Изменяя параметры фазовращательного мостика, фазу тока в обмотке напряжения можно подобрать так, чтобы результирующие ампервитки реле, определяемые как разность ампервитков обмоток тока и напряжения, были меньше ампервитков отпуска якоря реле или равнялись нулю. Во время включения двигателя в сеть реле работает как максимальное токовое. Под действием тока $i=2{,}8$ и напряжения $u=0{,}38$ реле притягивает якорь, включает пусковую емкость. При этом $i=4$, а $u=0{,}6$. При номинальной скорости и пусковой емкости $i=1$, $u=1{,}5$. Магнитная система реле размагничивается, якорь его отпадает, пусковая емкость отключается. При этом ток $i=1$, напряжение $u=1$.

Если же нагрузка на валу двигателя увеличилась до значений, при которых срабатывает реле (например, $i=2$), то, поскольку напряжение понижается до 0,6, реле снова притягивает якорь, подключая дополнительную емкость. Этим самым созда-

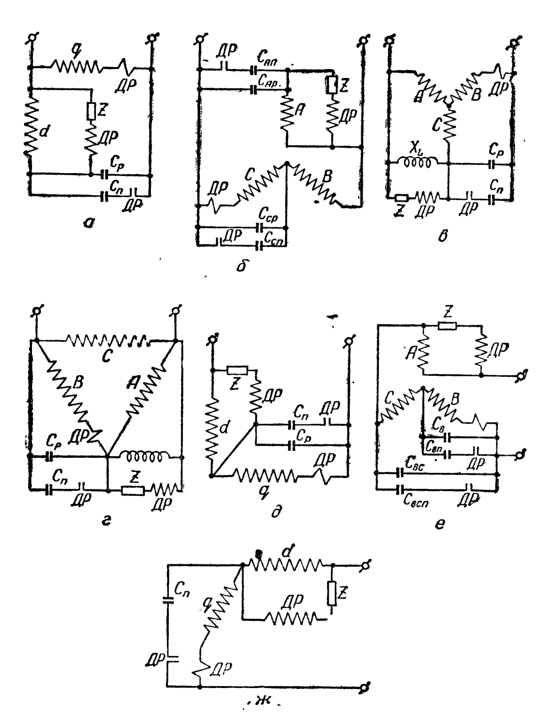


Рис. 98. Схемы управления пуском ОКД при использовании дифференциальных реле с нормально открытыми главными контактами.

а — параллельное включение обмоток; *б* — последовательно-параллельное включение обмоток; *в* — включение обмоток в звезду; *г* — включение обмоток в треугольник; *д* — последовательное включение обмоток; *е* — последовательное включение с двукратным шунтированием.

ется возможность повысить перегрузочную способность ОКД.

Пуск ОКД с двухфазной обмоткой статора также может быть автоматизирован при использовании регулируемых параметров тока основной и напряжения вспомогательной фазы.

На рис. 98 *а,б* приведены схемы автоматического управления пуском ОКД при использовании электромагнитного дифференциального реле. В этих схемах использованы регулируемые параметры: ток основной и напряжение вспомогательной фаз (см. рис. 97).

Зависимость тока I_q и напряжения U_d ОКД при параллельном или последовательном включении главной и вспомогательной обмоток от скорости также может быть использована для автоматического отключения пусковой емкости. При включении пусковой емкости напряжение вспомогательной фазы приблизительно в два раза выше, чем при рабочей емкости. После отключения пусковой емкости размагничивающие ампер-витки обмотки напряжения уменьшаются.

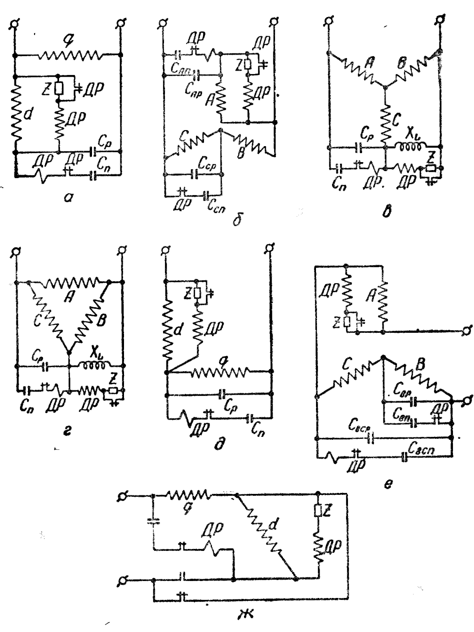


Рис. 99. Схемы управления пуском ОКД при использовании дифференциальных реле с нормально закрытыми главными контактами.

При перегрузке двигателя, когда ток основной фазы увеличивается до значений срабатывания реле и включена только рабочая емкость, можно настроить схему таким образом, чтобы по достижении некоторого определенного скольжения включалась пусковая емкость. Двигатель опять развивает большой момент вращения, разгоняется до номинальной скорости, пусковая емкость отключается.

Таким образом, используя ток основной и напряжение вспомогательной фаз, можно построить схемы автоматического управления, в которых дополнительная емкость включается на время пуска через нормально открытые контакты.

Для автоматического управления пуском однофазных двигателей можно использовать также такие регулируемые параметры: ток, протекающий через конденсаторную батарею, и напряжение вспомогательной («индуктивной») фазы. Пусковая емкость при этом включается через нормально закрытые контакты. Ток конденсаторной батареи и напряжение вспомогательной фазы изменяются по разным законам при увеличении скорости. В связи с этим при росте скорости намагничивающие ампер-витки увеличиваются, реле притягивает якорь, отключает пусковую емкость и одновременно отключает свою же токовую обмотку. После отключения пусковой емкости реле работает как реле напряжения. На рис. 99 приведены схемы автоматического управления пуском ОКД. Для этого используются ДР с нормально

закрытыми главными контактами и регулируемые параметры: ток пусковой емкости и напряжение вспомогательной фазы.

ДР имеет две обмотки, расположенные на одной магнитной системе. Условия его работы в значительной мере отличаются от условий работы известных электромагнитных реле. Необходимо поэтому несколько подробнее остановиться на принципе его работы.

Основные уравнения ДР. ДР с нормально открытыми главными контактами

Рассмотрим ДР с нормально открытыми главными контактами. Магнитная система его: П- или Ш-образный сердечник. К якорю реле прикрепляется подвижный контакт. Обмотки тока и напряжения располагаются на одном сердечнике.

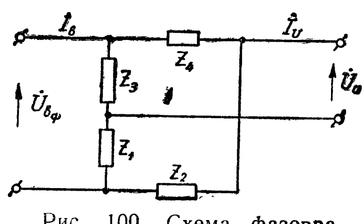


Рис. 100. Схема фазовращательного моста.

Для включения реле необходимо, чтобы в воздушном зазоре возник магнитный поток $\Phi_п$, при котором якорь притягивается. Если магнитный поток будет меньше, якорь отпадает, реле размыкает контакт. Одна из обмоток реле включается последовательно с главной фазой двигателя. Ток этой обмотки определяется, главным образом, параметрами двигателя. Другая обмотка включается на напряжение вспомогательной фазы. Величина потока, сцепляющегося с обмоткой напряжения, зависит от величины приложенного напряжения. Возникает вопрос, при каких условиях рабочий магнитный поток будет меньше потока отпуска реле. Для выяснения этого рассмотрим основные уравнения реле.

Обозначим через r_i и r_u, L_i и L_u активные сопротивления и коэффициенты самоиндукции обмоток тока и напряжения реле; M — коэффициент взаимной индукции. Обмотка напряжения реле включается через фазовращательный мост, параметры которого пусть будут Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 (рис. 100). Сопротивление Z_4 большей частью емкостное. Сопротивления Z_1, Z_2, Z_3 чаще всего активные. Для общности будем предполагать их комплексами.

Уравнения цепи тока и напряжения можно записать как уравнения двухобмоточного трансформатора

$$\dot{U}_i = \dot{I}_i (r_i + j\omega L_i) + j\omega M \dot{I}_u , \tag{482}$$

$$\dot{U}_u = \dot{I}_u (r_u + j\omega L_u) + j\omega M \dot{I}_i . \tag{483}$$

Уравнения фазовращательного мостика запишем как уравнения пассивного четырехполюсника

$$\dot{U}_{в.ф} = A_{11} \dot{U}_u + A_{12} \dot{I}_u; \tag{484}$$

$$\dot{I}_в = A_{21} \dot{U}_u + A_{22} \dot{I}_u . \tag{485}$$

При этом [78]

$$A_{11}A_{22}-A_{12}A_{21}=1, \quad (486)$$

$$A_{11}=\frac{(Z_1+Z_3)(Z_2+Z_4)}{Z_1Z_4-Z_2Z_3}, \quad (487)$$

$$A_{12}=\frac{Z_1Z_2Z_3+Z_2Z_3Z_4+Z_1Z_3Z_4+Z_1Z_2Z_4}{Z_1Z_4-Z_2Z_3}, \quad (488)$$

$$A_{21}=\frac{Z_1+Z_2+Z_3+Z_4}{Z_1Z_4-Z_2Z_3}, \quad (489)$$

$$A_{22}=\frac{(Z_1+Z_2)(Z_3+Z_4)}{Z_1Z_4-Z_2Z_3}. \quad (490)$$

Уравнения (482)—(485) связывают шесть величин ($\dot{U}_i$, $\dot{I}_i$ $\dot{U}_u$, $\dot{I}_u$, $\dot{U}_{в.ф}$, $\dot{I}_в$). Ток главной фазы I_i и напряжение вспомогательной фазы $U_{в.ф}$ заданы. Поэтому приведенных уравнений достаточно для решения задачи. Необходимо определить ток в обмотке напряжения реле $\dot{I}_u$ через напряжение вспомогательной фазы и выяснить условия, при которых реле может включить и отключить дополнительную емкость во время пуска.

Исключая $\dot{U}_u$ в (483), получаем

$$\dot{U}_{в.ф}=\dot{I}_u[A_{12}+A_{11}(r_u+j\omega L_u)]+A_{11}j\omega M\dot{I}_i. \quad (491)$$

Намагничивающие ампер-витки магнитной системы реле равны сумме комплексов ампер-витков обмоток

$$AW=\dot{I}_i w_i+\dot{I}_u w_u. \quad (492)$$

Принимая, что параметры реле не влияют на ток основной и напряжение вспомогательной фаз, определим суммарные ампер-витки из такого соотношения в комплексной форме:

$$AW=\dot{I}_i w_i-\frac{A_{11}j\omega M\dot{I}_i w_u}{[A_{12}+A_{11}(r_u+j\omega L_u)]}+\frac{U_{в.ф}w_u}{[A_{12}+A_{11}(r_u+j\omega L_u)]}. \quad (493)$$

Уравнение (493) позволяет определить ампер-витки реле при известных параметрах реле и фазовращательного мостика. Можно найти более простые соотношения между параметрами для случая, когда обмотки тока и напряжения реле уравновешены и $AW=0$.

В этом случае

$$\dot{I}_i w_i=-\dot{I}_u w_u. \quad (494)$$

При этом напряжение первичной обмотки, как можно видеть из уравнения (482), определяется соотношением

$$\dot{U}_i=I_i\left[r_i+j\omega\left(L_i-M\frac{w_i}{w_u}\right)\right]. \quad (495)$$

Напряжение обмотки напряжения реле в уравновешенном режиме

$$\dot{U}_u = \dot{I}_u \left[r_u + j\omega \left(L_u - M \frac{w_u}{w_i} \right) \right] \tag{496}$$

определяется сопротивлениями активным и реактивным от потоков рассеяния.

Полное сопротивление обмотки напряжения реле в режиме полной компенсации ампер-витков обмоток тока и напряжения

$$Z_u = \frac{\dot{U}_u}{\dot{I}_u} = r_u + j\omega \left[L_u - M \frac{w_u}{w_i} \right]. \tag{497}$$

Из (484) находим соотношение между током $\dot{I}_u$ и напряжением вспомогательной фазы

$$\dot{U}_{в.ф} = [A_{11} Z_u + A_{12}] \dot{I}_u . \tag{498}$$

Учитывая (494), находим соотношение параметров реле и фазовращательного мостика, при которых достигается полная компенсация ампер-витков тока и напряжения

$$A_{11} Z_u + A_{12} = -\frac{w_u}{w_i} \frac{U^0_{в.ф}}{I^0_i}. \tag{499}$$

Верхние индексы „0“ обозначают, что при этих значениях тока и напряжения ампер-витки реле равны нулю. Соотношение (499) позволяет более просто определить суммарные ампер-витки реле.

Подставляя в (499) значение Z_u, определим знаменатель в соотношении (493)

$$A_{12} + A_{11} (r_u + j\omega L_u) = \frac{w_u}{w_i} \left[j\omega M A_{11} - \frac{U^0_{в.ф}}{\dot{I}^0_i} \right]. \tag{500}$$

Результирующие ампер-витки реле при этом определяются уравнением

$$AW = \dot{I}_i w_i \frac{\frac{U_{в.ф}}{\dot{I}_i} - \frac{\dot{U}^0_{в.ф}}{\dot{I}^0_i}}{j\omega M A_{11} - \frac{\dot{U}^0_{в.ф}}{\dot{I}^0_i}}. \tag{501}$$

Уравнение (493) может быть записано с учетом (497) в таком виде:

$$AW = \dot{I}_i w_i \frac{A_{12} + A_{11} Z_u + \frac{\dot{U}_{в.ф}}{\dot{I}_i} \frac{w_u}{w_i}}{A_{12} + A_{11} (r_u + j\omega L_u)}. \tag{502}$$

Сумма $A_{12} + A_{11} Z_u$ согласно (499) определяется отношением комплексов регулируемых параметров, при которых суммарные ампер-

витки реле равны нулю. В общем случае эта сумма может быть равна произвольному комплексу, определяемому соотношением (499) и выбираемому таким, чтобы реле отключалось. Поэтому суммарные ампер-витки реле могут быть определены соотношением

$$AW = \dot{I}_i w_i \frac{\frac{\dot{U}_{в.ф}}{\dot{I}_i} - \frac{\dot{U}^0_{в.ф}}{\dot{I}^0_i}}{[A_{12} + A_{11}(r_u + j\omega L_u)]\frac{w_i}{w_u}}. \qquad (503)$$

Выражая токи и напряжения через относительные значения (при номинальных напряжении и токе, равных номинальным фазным напряжению и току), находим

$$Aw = I_н w_i Z_н \frac{\bar{I}_i\left(\frac{\bar{U}_{в.ф}}{\bar{I}_i} - \frac{\bar{U}^0_{в.ф}}{\bar{I}^0_i}\right)}{[A_{12} + A_{11}(r_u + j\omega L_u)]\frac{w_i}{w_u}}, \qquad (504)$$

где $Z_н = \frac{U_н}{I_н}$ — номинальное сопротивление двигателя и

$$\frac{\dot{U}^0_{р.ф}}{\dot{I}^0_i} = Z_н \frac{\bar{U}^0_{в.ф}}{\bar{I}^0_i}.$$

Соотношение (504) показывает, что ампер-витки реле зависят от величины регулируемых параметров, определяемых коэффициентом регулируемых параметров

$$k_{р.п} = \bar{I}_i\left(\frac{\bar{U}_{в.ф}}{\bar{I}_i} - \frac{\bar{U}^0_{в.ф}}{\bar{I}^0_i}\right), \qquad (505)$$

а также от параметров фазовращательного мостика и коэффициента самоиндукции обмотки реле. Последний изменяется в широких пределах в зависимости от положения якоря реле. Для отдельных образцов коэффициент самоиндукции обмотки напряжения изменяется в три раза.

При отпуске якоря индуктивность обмотки реле уменьшается, ампер-витки обмотки напряжения увеличиваются. Начальный процесс отключения происходит при замкнутом якоре. Поэтому важно изучить изменения соотношения регулируемых параметров, определяемые уравнением (505).

Коэффициент регулируемых параметров — сложная функция параметров двигателя и конденсаторной батареи.

Для определения коэффициента регулируемых параметров наиболее приемлемо графическое изображение отношения комплексов регулируемых параметров $Z = \frac{\bar{U}_d}{\bar{I}_q}$ при рабочей и пусковой емкостях.

На рис. 101 приведены годографы отношения комплексов $\bar{Z}=\frac{\bar{U}_d}{\bar{I}_q}$ двигателя А 41-6 при последовательном включении симметричных обмоток в случае $C=73{,}4$ *мкф* и $C=272$ *мкф*. Чем больше скорость и разность пусковой и рабочей емкостей, тем дальше отстоят друг от друга точки Z, соответствующие одной и той же скорости. При $Z_0=-0{,}5+j\,0{,}4$ (точка C на рис. 101) изменения коэффициентов регулируемых параметров двигателя

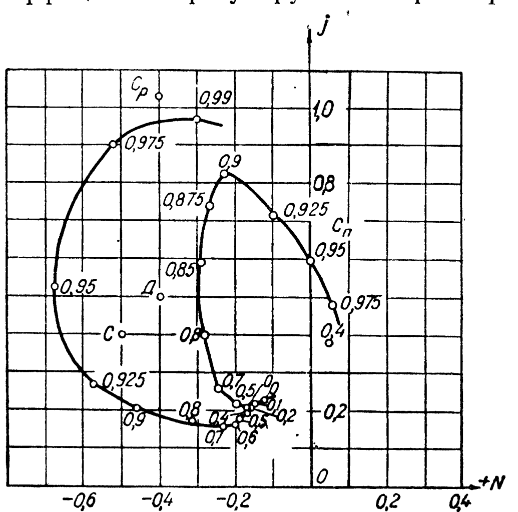


Рис. 101. Годограф отношения комплексов регулируемых параметров $\bar{Z}=\frac{\bar{U}_d}{\bar{I}_q}$ двигателя А 41-6 с симметричными последовательно соединенными обмотками при $C_р=73{,}4$ *мкф*, и $C_п=272$ *мкф*.

А 41-6 при рабочей и пусковой емкостях показаны сплошными линиями на рис. 102. При рабочей емкости и неподвижном роторе $K_{р.п}=0{,}9$. После подключения дополнительной емкости $K_{р.п}=1{,}06$. При $n=0{,}75$ и пусковой емкости $K_{р.п}=0{,}43$. При рабочей емкости $K_{р.п}=0{,}56$. При включенной пусковой емкости ампер-витки реле малы, якорь отпадает, отключая дополнительную емкость. На холостом ходу двигателя ($n=0{,}99$) при рабочей емкости коэффициент регулируемых параметров $k_{р.п}=0{,}48$. При повышении напряжения на 15% реле не срабатывает. Коэффициент возврата реле может быть невысоким ($\kappa_в=0{,}5$). Коэффициенты регулируемых параметров реле могут изменяться несколько иначе, если изменить значение $\bar{Z}_0$.

Штриховыми линиями на рис. 102 показано изменение коэффициента регулируемых параметров при $\bar{Z}_0=-0{,}4+j\,0{,}5$ (точка D на рис. 101).

При пусковой емкости $к_{р.п}$ изменяется сильнее, при рабочей — меньше. При холостом ходе и рабочей емкости $k_{р.п}=0,38$. На холостом ходу реле не включит пусковую емкость даже при значительных повышениях напряжения. Коэффициент возврата реле в данном случае должен быть несколько выше ($k_в = 0,6$).

Следовательно, чем меньше величина емкости, подключаемой при помощи реле, тем точнее можно настроить реле на от-

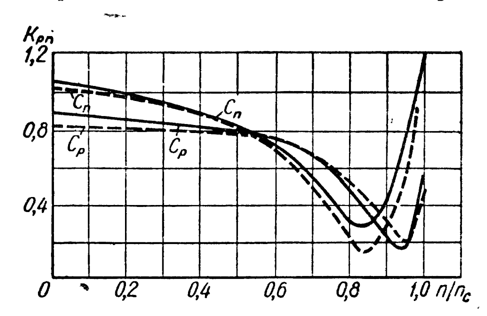


Рис. 102. Зависимость от скорости коэффициента регулируемых параметров двигателя А 41-6 при $C_р=73,4$ *мкф*, $C_п=272$ *мкф*. Сплошной изображена кривая $Z_0=-0,5+j\ 0,4$ (точка *C* на рис. 101); пунктиром — $Z_0=-0,4+j\ 0,5$, (точка *D* на рис. 101).

ключение и подключение и тем меньше разница в скоростях, при которых срабатывает реле.

На рис. 103 представлены годографы Z_0 двигателя А 41-6 с последовательно включенными обмотками, диаметральным шагом и номинальным напряжением 220 *в* при рабочей емкости 98,7 *мкф* и при емкости 194,9 *мкф*, т. е. приблизительно в два раза больше, чем рабочая.

Годографы отношения комплексов регулируемых параметров при этих емкостях сдвигаются один относительно другого на небольшой угол, поэтому коэффициент регулируемых параметров дифференциального реле при номинальной скорости может быть меньше, чем необходимо для отпуска реле как при рабочей, так и при дополнительной емкости (рис. 104). Этим и объясняется то обстоятельство, что в любом случае при номинальной скорости дополнительная емкость отключается.

Реле чувствительно к понижению скорости двигателя; оно может быть использовано для повышения перегрузочной способности ОКД.

В некоторых приводах, например привод шахтного конденсатора электровоза, используются три ступени емкости: рабочая $C_р$, перегрузочная $C_{пр}$, предназначенная для повышения перегрузочной способности ОКД, и пусковая емкость $C_п$. Перегрузочная емкость должна включаться при повышении и пониже-

нии скорости. Включение перегрузочной емкости на скорости, выше синхронной, дает возможность осуществить надежное генераторное торможение электровоза.

Автоматическое управление ОКД в этом случае целесообразно осуществить с использованием реле напряжения для управ-

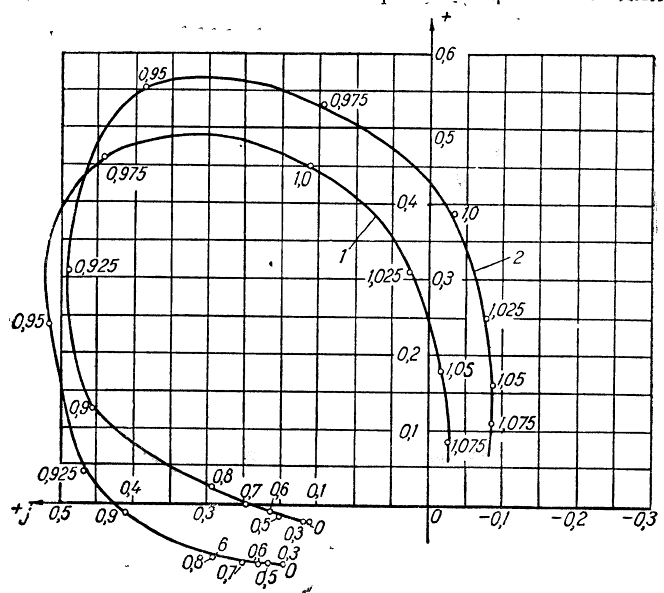


Рис. 103. Годограф отношения комплексов регулируемых параметров $\bar{Z}=\frac{\bar{U}_d}{\bar{I}_q}$ двигателя А 41-6 при последовательном включении симметричных обмоток с диаметральным шагом:

1—C=98,7 мкф, 2—C=194,9 мкф.

ления пусковой емкостью и ДР для управления перегрузочной емкостью.

На рис. 105 приведены примеры таких схем при включении обмоток ОКД в треугольник и при последовательном соединении обмоток.

Схемы, показанные на рис. 96 и рис. 98, дают возможность построить схемы управления и для других типов ОКД.

В представленных на рис. 105 схемах автоматического управления пуском ОКД для отключения первой ступени емкости используется реле напряжения. Вторая ступень отключается при помощи ДР с нормально открытыми главными контактами. В начале пуска ДР работает как максимальное токовое и надежно подключает добавочную емкость. После срабатывания реле напряжения включается обмотка напряжения ДР и возможно отключение добавочной емкости. На рис. 106 приведена осцил-

лограмма работы схемы, показаны ток пусковой и дополнительной емкостей, напряжения конденсаторов и сети в функции ско-

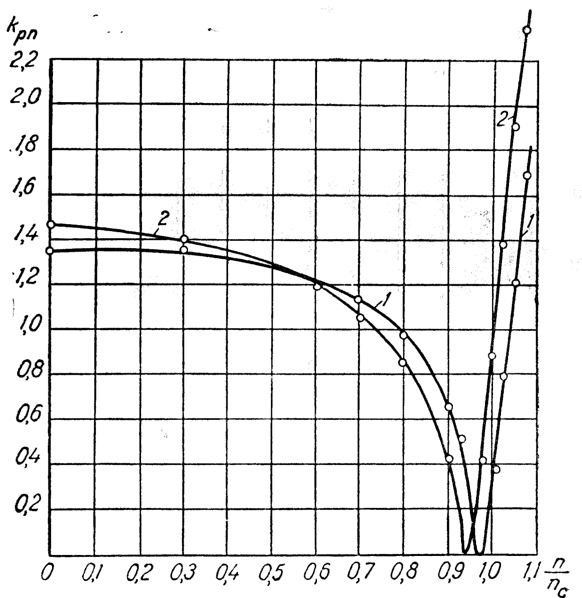


Рис. 104. Зависимость от скорости коэффициента регулируемых параметров двигателя А 41-6 при последовательном включении симметричных обмоток с диаметральным шагом:
1—С=98,7 мкф, 2—С=194,9 мкф.

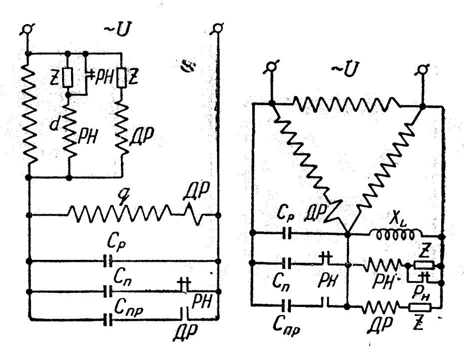


Рис. 105. Схемы управления ОКД при двухступенчатом изменении емкости.

рости. При увеличении скорости выше синхронной ДР включает дополнительную емкость.

ДР с нормально открытыми контактами настраиваются легко не только при двухфазной обмотке статора. Анализ зависи-

мостей регулируемых параметров от скорости и опыт настройки реле показывают, что ДР с нормально открытыми главными контактами может быть успешно использовано в ОКД.

На рис. 107 показан общий вид ДР, предназначенного для двигателей мощностью 1—4,5 *квт*.

Обмотки напряжения и тока располагаются на одном стержне П-образной магнитной системы. Подвижные контакты реле

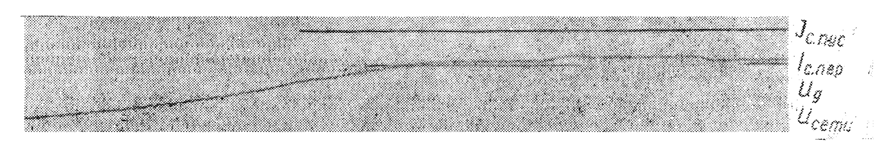


Рис. 106. Осциллограммы работы схемы с двухступенчатым изменением емкости (двигателя А 41-6, U=220 *в*, $C_р$ = 98,7 *мкф*, $C_{пр}$ = 96,2 *мкф*, $C_п$ =250 *мкф*)

укрепляются на текстолитовой планке, жестко соединенной с якорем.

Магнитная система и контакты крепятся на изоляционной доске. Сечение магнитного сердечника, на котором расположены

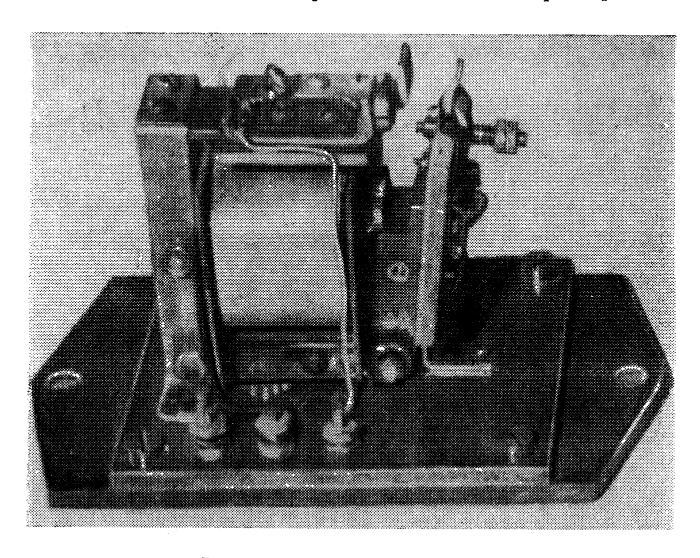


Рис. 107. Внешний вид ДР.

обмотки, равно 20×20 *мм*^{2}, число витков токовой обмотки изменяется от 8 до 16 в зависимости от типа двигателя.

Обмотка напряжения имеет 2000—3000 витков из провода марки ПЭВ диаметром 0,16 *мм*.

ДР с нормально закрытыми главными контактами

С приведенных на рис. 99 схемах автоматического управления пуском однофазных двигателей используется ДР с нормально закрытыми главными контактами.

В этом реле главной является обмотка напряжения, включаемая на вспомогательную («индуктивную») фазу. Обмотка тока включается последовательно с той частью емкости, которая присоединяется через контакты реле. Обмотки напряжения и тока при неподвижном роторе уравновешиваются.

Основные уравнения двухобмоточного реле, полученные для дифференциального с нормально открытыми главными контактами, пригодны и для рассматриваемого реле.

Обозначая, как и раньше,

$$A_{12} + A_{11} Z_u = A_{12} + A_{11} \left(r_u + j\omega L_u - j\omega M \frac{w_u}{w_i} \right) = - \frac{w_u}{w_i} \frac{\dot{U}^0_{\text{в.ф}}}{\dot{I}^0_i},$$

после преобразований находим уравнение ампер-витков реле в таком виде:

$$AW = \frac{\bar{U}_{\text{в.ф}} \left[1 - \frac{Z_0}{Z} \right] U_{\text{н}} w_{\text{н}}}{A_{12} + A_{11} (r_u + j\omega L_u)}. \quad (506)$$

При этом

$$Z_0 = \frac{\bar{U}^0_{\text{в.ф}}}{\bar{I}^0_i} \quad (507)$$

и

$$Z = \frac{\bar{U}_{\text{в.ф}}}{\bar{I}_i} - \quad (508)$$

комплексы отношения значений напряжения и тока.

Величина Z_0 выбирается такой, чтобы при неподвижном роторе контакты реле были замкнуты; Z зависит от скорости двигателя. При срабатывании реле, когда $I_i = 0$, имеем $Z = \infty$.

Ампер-витки реле полностью определяются напряжением вспомогательной фазы. Для характеристики изменения ампервитков реле можно воспользоваться коэффициентом регулируемых параметров, который для данного реле приобретает вид

$$k_{\text{р.п}} = \bar{U}_{\text{в.ф}} \left[1 - \frac{Z_0}{Z} \right]. \quad (509)$$

Ток, протекающий через обмотку реле, включаемую последовательно с емкостью, может быть определен через напряжение конденсаторной батареи и величину емкости

Определяя через напряжение и емкость, включенную последовательно, ток обмотки

$$\bar{I}_i = \frac{\omega C \bar{U}_c U_н}{I_н}$$

и вводя углы сдвига фаз между $\dot{U}_{в.ф}$ и $\dot{I}_i$, находим коэффициент регулируемых параметров

$$k_{р.п} = \bar{U}_{в.ф}\left[1 - \frac{\dfrac{\bar{U}^0_{в.ф}}{\bar{U}^0_c}}{\dfrac{\bar{U}_{в.ф}}{\bar{U}_c}} e^{j(\varphi_0 - \varphi)} \frac{C}{C_0}\right]. \qquad (510)$$

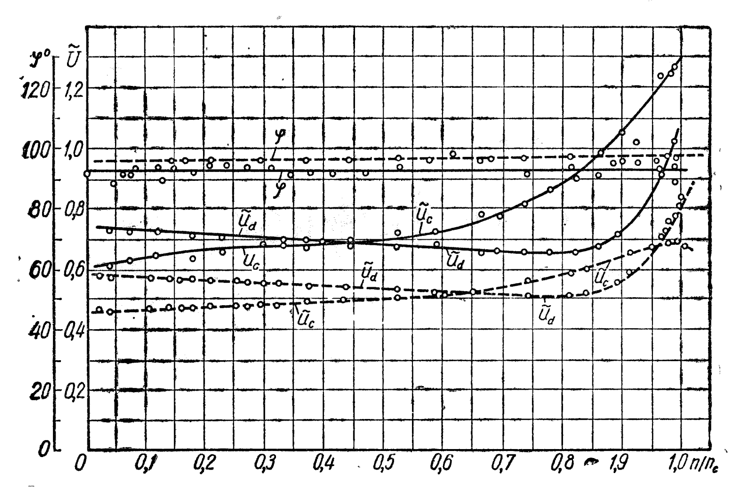


Рис. 108. Зависимость от скорости и емкости регулируемых параметров схем с ДР с нормально закрытыми главными контактами (двигатель А 41-6 с симметричными двухфазными обмотками, $U=220$ *в*, $I_н=4$ *а*, $I_c = \omega C U_н \bar{U}_c$). Сплошная линия — $C = 272$ *мкф*, пунктир — $C = 73{,}4$ *мкф*.

Рассмотрим значение коэффициента $\kappa_{р.п}$ для двигателя А 41-6 при последовательном включении симметричных обмоток.

На рис. 108 приведены зависимости напряжений U_d и U_c и сдвига фаз между U_d и I_c при пусковой и рабочей емкостях. Как видно из рис. 108, угол φ изменяется мало при изменении скорости. При $\varphi = \varphi_0$ и $C = C_0$ абсолютное значение коэффициента регулируемых параметров.

$$k \quad = \bar{U}_{в.ф} - k\bar{U}_C . \qquad (511)$$

На рис. 109 кривая *2* показывает значение $k_{р.п}$ при $k=1{,}225$, кривая *3* — при $k=1{,}5$, кривая *4* — при $k=1{,}7$. После отклю-

чения емкости токовая обмотка, как правило, отключается, реле работает как реле напряжения. Изменение регулируемого параметра определяется для этого случая кривой *1* (U_d).

На рис. 109 следует, что применение встречно включенной токовой обмотки позволяет значительно уменьшить ампер-витки реле при пуске, сделать реле более чувствительным на срабатывание и отключение пусковой емкости. Однако в некоторых случаях реле нельзя использовать как перегрузочное аналогично ДР с нормально открытыми главными контактами (регулируемые параметры: ток главной и напряжение вспомогательной фаз). Это видно из изменения напряжения $\bar{U}_d$ при рабочей емкости (кривая *1*, рис. 109). При номинальных нагрузке и напряжении сети и рабочей емкости имеем $\bar{U}_d = 0{,}6$. При $n = 0{,}75$ напряжение фазы d минимальное и равно 0,52.

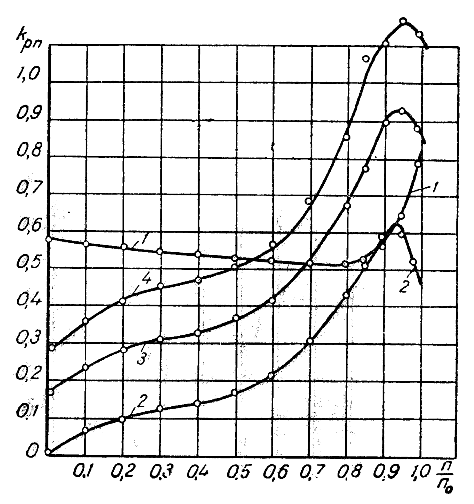


Рис. 109. Коэффициент регулируемых параметров ДР с нормально закрытыми главными контактами для двигателя А 41-6 при $C_р = 73{,}4$ *мкф*, $C_п = 272$ *мкф*; *1*—$\tilde{U}_d$ (при $C = 73{,}4$ *мкф*.); *2*—$K_{р.п} = 1{,}225U_c - \tilde{U}_d$; *3*—$K_{р.п} = 1{,}5\tilde{U}_c - U_d$; *4*—$K_{р.п} = 1{,}7U_c - \tilde{U}_d$.

Для того чтобы реле могло включить дополнительную емкость при перегрузках двигателя, напряжение отпуска реле должно быть $U_{отп} = 0{,}55$, что находится в пределах возможных колебаний напряжения; поэтому контакты будут периодически замыкаться и размыкаться. Преимущества ДР с нормально закрытыми главными контактами и заключаются в простоте настройки и возможности пуска двигателя даже при значительных падениях напряжения.

Приставки ОКД

Рабочие и пусковые характеристики ОКД в значительной степени определяются схемой включения обмотки статора и значением параметров дросселей и конденсаторов, используемых для преобразования однофазного тока в многофазный.

Пусковые емкости выбираются из условия получения требуемых значений токов и моментов при пуске. Рабочие емкости и индуктивности выбираются так, чтобы при номинальной скорости был уравновешенный режим. При этом мощность однофазного двигателя равна или близка мощности двигателя при

симметричном включении. Когда обмотка статора выполнена с двумя фазами, занимающими равное число пазов, мощность двигателя при симметричном включении равна 94% мощности трехфазного двигателя в том же габарите. При двухфазной обмотке статора мощность конденсаторной батареи в уравновешенном режиме равна потребляемой из сети активной мощности. При трехфазной обмотке статора мощность конденсаторных

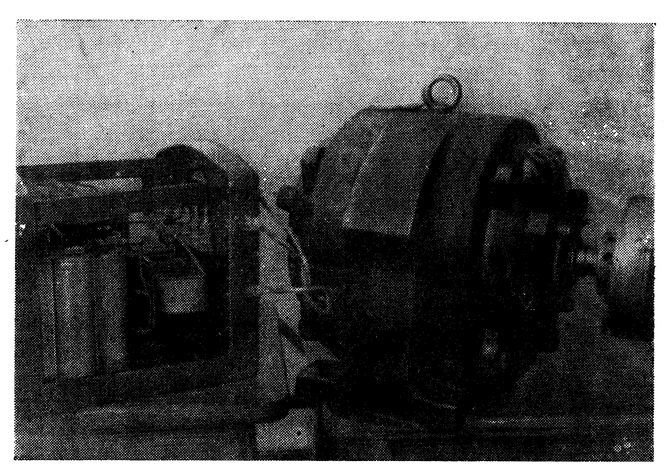


Рис. 110. Приставка к двигателю А 41-6.

батарей или суммарная мощность конденсаторов и дросселя на 15% выше потребляемой из сети активной мощности. В ОКД с последовательно соединенными и двукратно шунтированными обмотками статора мощность конденсаторных батарей почти равна полезной мощности двигателя при использовании мощности габарита на 90—94%.

Таким образом, существующие в настоящее время схемы позволяют эффективно использовать серийные трехфазные асинхронные двигатели при питании от однофазной сети.

При электрификации сельского хозяйства значительная экономия средств достигается применением смешанных, трехфазно-однофазных электрических сетей. В сельском хозяйстве применяются однофазные сети напряжением 220 и 440 *в* и трехфазные сети напряжением 380 *в*. Электрические двигатели должны быть приспособлены для работы во всех этих сетях, что достигается при использовании в качестве ОКД трехфазных двигателей с фазным напряжением 220 *в*.

Применение трехфазных двигателей в качестве ОКД не только избавляет нас от разработки и освоения ОКД общего применения мощностью выше 1 *квт*, но и позволяет улучшить использование мощности габарита, делает двигатели универсальными.

Использование электромагнитных реле для управления ОКД позволяет все оборудование, необходимое для работы трехфазных двигателей от однофазной сети, разместить в отдельном ящике, называемом приставкой (рис. 110). Для двигателей общего применения в приставках размещаются рабочие конденсаторы, индуктивность, пусковые конденсаторы, электромагнитное реле для отключения пусковой емкости, плавкие вставки для защиты конденсаторов. При применении приставок с автоматическим отключением пусковой емкости обслуживание однофазных двигателей делается таким же простым, как и трехфазных двигателей.

Опыт эксплуатации конденсаторных двигателей показывает, что их с успехом можно применять не только для машин с постоянным моментом сопротивления (сепараторы, маслоизготовители, вентиляторы, центробежные насосы, соломодувы), но и для машин с пульсирующим или переменным моментом сопротивления (например, для поршневых насосов, корне- и соломорезок).

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Г. Захарин и И. А. Будзко, Смешанная система распределения электроэнергии в сельскохозяйственных районах, «Электричество», № 1, 1939, стр. 21.

2. Руководство по использованию смешанной, трехфазно-однофазной системы электроснабжения сельскохозяйственных потребителей, Техническое управление Министерства городского и сельского строительства СССР, К., 1955.

3. А. И. Будзко, Сельские электрические сети, Сельхозгиз, М., 1955.

4. А. Г. Захарин и П. В. Куц, О применении однофазной схемы для электроснабжения полевых электрифицированных машин, «Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства», № 2, 1953, стр. 64 — 69.

5. Г. Н. Петров и Ю. С. Чечет, Современные типы трансформаторов и электродвигателей для сельской электрификации, Вопросы электроэнергетического оборудования для электрификации сельского хозяйства, Труды Всесоюзной научно-технической сессии, Госэнергоиздат, М., 1952, стр. 236 — 253.

6. И. А. Будзко, Однофазные электродвигатели с пусковыми электролитическими конденсаторами, «Электричество», № 4, 1941, стр. 20 — 22.

7. Ю. С. Чечет, Электрические микромашины, «Электричество», 1955, № 8, стр. 46.

8. I. B. Stere, Adapting Electric Motors to Tarm Service, «Agricultural Engineering», vol. 35, № 9, 1954, pp. 630—634.

9. Н. А. Сазонов, Комплексное потребление электроэнергии в сельском хозяйстве, Вопросы электроэнергетического оборудования для электрификации сельского хозяйства, Труды Всесоюзной научно-технической сессии, Госэнергоиздат, М., 1952, стр. 66 — 73.

10. Л. Я. Цивьян, Передвижной многоскоростной электропривод для сельского хозяйства, «Электричество», № 6, 1949, стр. 51 — 53.

11. П. В. Куц и М. Т. Жулин, Пуск трехфазных асинхронных короткозамкнутых электродвигателей от однофазных сетей смешанной системы распределения электроэнергии, «Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства», № 3, 1953, стр. 86 — 88.

12. Н. Д. Торопцев, Электрификация подвесных дорог животноводческих ферм с использованием асинхронного трехфазного двигателя, рабо-

тающего от сети однофазного тока, Автореферат канд. диссертации, Московский институт электрификации сельского хозяйства, 1956.

13. Б. А. Поляков, Конденсаторные установки для повышения коэффициента мощности, Госэнергоиздат, М. — Л., 1950.

14. И. И. Морсзов, Танталовые электролитические конденсаторы, «Электричество», № 7, 1957.

15. Г. И. Сканави и Е. Н. Матвеева, Новые диэлектрики с весьма высокой диэлектрической проницаемостью и малой проводимостью, не обладающие сегнетоэлектрическими свойствами, Журнал экспериментальной и теоретической физики, т. 30, вып. 6, 1956, стр. 1042.

16. Л. Н. Закгейм, Электролитические конденсаторы, Госэнергоиздат, М. — Л., 1954.

17. I. Biermanns, Über einen Einphasen-Inductionsmotor, «Archiv für Elektrotechnik», Bd. 17, 1927, s. 519.

18. F. Punga, Graphische Behandlung des Einphasen — Induktionsmotors mit Kapazität und Hilcphase, «Archiv für Elektrotechnik», Bd. 18, 1927, s. 267.

19. H. Wolf, Der Einphasen-Inductionsmotor mit Kondensatoren in der Hilfsphase, «Archiv für Elektrotechnik», Bd. 23, 1930, s. 459.

20. F. Kacser, Das Anzugsmoment und die Strenung von Einphasenmotoren mit Hilfsphase, «Elektrotechnik und Maschinenbau», Bd. 49, 1931, s. 593.

21. W. Thoma, Über das Anlaufmoment des asynchronen Einphasenmotors mit Hülfsphase, «Archiv für Elektrotechik», Bd. 26, 1932, s. 856.

22. F. Punga, Das Stromvektordiagramm des Einphasenmotors mit Kapazität in der Hilfsphase, ETZ, Jahrgang 54, 1933, ss, 307, 347.

23. M. Krondl, Berechnung von Einphasen-Kondensator-Motoren, «Elektrotechnik und Maschinenbau», Bd. 52, 1934, s. 133.

24. W. Schuisky, Das Anlaufmoment des Einphasenmotors mit Hilfsphase, ETZ, Jg. 56, 1935, s. 1275.

25. В. С. Кулебакин, О новой системе однофазной электрической тяги с конденсаторными асинхронными двигателями, Труды МЭИ, вып. 1, 1937, стр. 46 — 61.

26. Г. Б. Меркин и В. И. Коновалов, О конденсаторных моторах, Труды Ленинградского индустриального института, вып. 1, № 1, 1936.

27. И. М. Булаев, Исследование пуска в ход и работы трехфазного асинхронного двигателя с конденсатором, питаемого однофазным током, Труды Ленинградского индустриального института, вып. 1, № 2, 1937.

28. И. М. Булаев, Питание однофазным током трехфазного асинхронного двигателя с конденсатором, «Электричество» № 12, 1937.

29. Г. Б. Меркин, Теория и расчет конденсаторных двигателей, Труды Ленинградского индустриального института, вып. 2, № 5, 1937.

30. Г. Б. Меркин, Конденсаторные электродвигатели, «Электричество», № 12, 1937.

31. Б. И. Станиславский, Основы теории конденсаторного двигателя, «Электричество», № 12, 1937, стр. 39.

32. Б. И. Станиславский, К расчету пусковой обмотки для однофазного асинхронного двигателя с конденсаторным пуском, «Вестник электропромышленности», № 10, 1937.

33. И. Б. Башук, Конденсаторные двигатели в применении к электрической тяге, «Электричество», № 6, 1939.

34. А. Я. Бергер, Л. Н. Грузов и др., Асинхронный двигатель в анормальных режимах, ОНТИ, М. — Л., 1935.

35. Л. П. Пантюхов, Работа индукционной машины в режиме однофазного конденсаторного двигателя, Канд. диссертация, Харьковский электротехнический институт, 1941.

36. В. Е. Розенфельд, М. И. Крайцберг, Б. Н. Тихменев, Рудничный электровоз с конденсаторными асинхронными двигателями, «Электричество», № 7, 1949.

37. W. Schuisky, Kondensatormotoren, «Elektrotechnik und Maschinenbau», Iahrgang 69, 1952, s. 10.

38. И. М. Камень, Определение пусковых характеристик однофазных асинхронных двигателей с пусковой обмоткой, «Электричество», № 8, 1952.

39. А. И. Важнов, Определение пусковой и рабочей емкости для конденсаторного двигателя, Труды Ленинградского политехнического института, «Электромашиностроение», № 3, 1953.

40. J. Matěju, Iednofazovy asynchronni motor s pomocnou fazi, «Elektrotechnik», № 2, 1955. (Прага).

41. G. Lacroux, Monteurs asynchronen monophases ä condensateur de demarrage. Determination du couple de demarrage, «Revue General de l'Electricite», 64, № 7, 1955, p. 323.

42. F. Kade, Die Auslegung asynchroner Einphasenmotoren mit Kondensator-Hilfsphase, «Elektrotechnik und Maschinenbau», Bd. 69, H. 2, 1952, s. 28.

43. Д. И. Секретев, Теоретическое и экспериментальное исследование основных параметров конденсаторных асинхронных электродвигателей, Автореферат канд. диссертации, Новочеркасский политехнический институт, 1955.

44. Ю. С. Чечет, Номографический метод построения характеристик однофазного асинхронного микродвигателя с расщепленной фазой, «Электричество», № 7, 1948.

45 Ю. С. Чечет, Расчет вспомогательной обмотки однофазного асинхронного микродвигателя, «Электричество», № 2, 1949.

46. Ю. С. Чечет, Влияние третьей пространственной гармоники магнитного потока на пусковые свойства трехфазного асинхронного двигателя, работающего от однофазной сети, «Электричество», № 3, 1950.

47. Ю. С. Чечет, Универсальный асинхронный микродвигатель, «Электричество», № 10, 1950.

48. Ю. С. Чечет, Управляемый асинхронный двигатель с полным ротором, Госэнергоиздат, М., 1955.

49. В. С. Кулебакин, Об устранении асимметрии намагничивающих сил в конденсаторных асинхронных двигателях, «Электричество», № 7, 1956.

50. V. A. Fynn, Einphasen — Induktionsmotor, 1909.

51. F. W. Suhr, Toward an Accurat Evaluation of Single-Phase Induction-Motor Constans, The Transdetions of the American Institute of Electrical Engineers, vol. 71, pt. III, 1952, p. 221.

52. А. В. Иванов-Смоленский, Исследование и расчет асинхронной многофазной машины с несимметричной обмоткой на статоре, Труды МЭИ, вып. VII, 1951, стр. 10—36.

53. Л. Н. Грузов, Методы математического исследования электрических машин, Госэнергоиздат, М., 1952.

54. И. М. Постников, Методы теоретического исследования однофазных конденсаторных двигателей, Труды Института электротехники АН УССР, 1956, № 14.

55. Е. Я. Казовский, Работа трехфазной машины переменного тока с асимметрией в обмотке статора, «Вестник электропромышленности», № 4, 1956.

56. L. G. Stokvis, Analysi of Unbalanced Three — phase Systems. Beactions a Generator Carrying an Unbalanced Load-Treated as Equivalent to two Balanced Loads. Electrical World, vol. 65, 1915, p. 1111-1115. Der Spanungsabfall des synchronen Drehstromgenerators bei unsymmetrische Belastung, R. Oldenbourg, Munich, 1915.

57. К. Ф. Вагнер и Р. Д. Эванс, Метод симметричных составляющих ОНТИ, Л.—М., 1936

58. М. П. Костенко, Электрические машины, часть специальная, Госэнергоиздат, М., 1949.

59. И. М. Камень, Методы исследования несимметричных схем асинхронных двигателей, «Электричество», № 11, 1950, стр. 44.

60. И. И. Камень, Работа асинхронного двигателя при несимметричных схемах и сопротивление нулевой последовательности, «Электричество», № 10, 1949, стр. 40.

61. Р. Рихтер, Электрические машины, т. IV, ОНТИ, М.—Л., 1939.

62. F. Stier, Das unsymmetrische Mehrphasensystem, ETZ—A, Bd. 74 H. 12, 1953, s. 361.

63. F. Kade, Nullfelder in Einphasenmotoren, ETZ—A, Bd. 76, H. 15, 1955.

64. H. Jordan, F. Lax, Vorausberechnung des Nullsystems unsymmetrischer Schaltungen von Drehstrom-Asynchronmaschinen, ETZ—A, Bd. 75, H. 20, 1954.

65. I. E. Brown, O. I. Butler, A. General method of Analysis of three-phase induction motors with asymmetrical primary connections, The Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, vol. 100, pt. II, № 73 1953, p. 25.

66. М. С. Левин и П. В. Куц, О сопротивлении нулевой последовательности асинхронных двигателей, «Электричество», № 2, 1953, стр. 37.

67. А. И. Адаменко, Определение направления вращения и схем замещения для симметричных составляющих асинхронных двигателей. Труды Института электротехники АН УССР, № 14, 1956.

68. О. І. Адаменко, Метод симетричних складових для несиметричних двофазних асинхронних машин, «Автоматика», № 2, 1956.

69. О. І. Адаменко, Рівняння двофазної несиметричної асинхронної машини в усталеному режимі, ДАН УРСР, № 2, 1957.

70. А. И. Адаменко, Высшие гармоники м. д. с. в однофазных конденсаторных двигателях, Изд-во АН УССР, 1957.

71. И. М. Постников и А. И. Адаменко, Особенности проектирования однофазных конденсаторных двигателей, «Вестник электропромышленности», № 10, 1957.

72. А. И. Адаменко, Работа асинхронного двигателя при несимметрии сети, обусловленной включением сопротивления в одну из фаз статора, Труды Института электротехники АН УССР, № 14, 1956.

73. И. М. Сыромятников, Режимы работы асинхронных электродвигателей, Госэнергоиздат, М., 1955.

74. Г. К. Жерве, Промышленные испытания электрических машин, Госэнергоиздат, М., 1950.

75. И. П. Боляев, Простой метод измерения вращающего момента асинхронного двигателя с помощью тормозной машины, Труды Новочеркасского политехнического института, Секция энергетическая, т. XXIII (XXVII), 1953.

76. К. В. Черторыжский, Электроавтоматика металлорежущих станков, Машгиз, К., 1951.

77. А. И. Вольдек, Схемы замещения индуктивно связанных цепей и их параметры, Труды Таллинского политехнического института, Серия А, № 40, 1952.

78. А. Д. Нестеренко, Основы расчета электроизмерительных схем уравновешивания, Изд-во АН УССР, 1953.

79. О. Б. Певзнер, Дифференциальное рассеяние асинхронных машин, Труды Ленинградского политехнического института, «Электромашиностроение», № 3, 1953.

80. М. Лившиц, Электрические машины, т. III, ОНТИ, М.—Л., 1936.

81. Т Г. Сорокер, Дифференциальное рассеяние многофазных асинхронных электродвигателей, «Вестник электропромышленности», № 6, 1956.

82. A. W. Kron, K. Bopp, Beitrag zur praktischen Berechnung des Koeffizienten der doppelverketteten Streuung, «Archiv für Elektrotechnik», Bd. XLI 1953, s. 136.

83. Т. Г. Сорокер и Ю. В. Мордвинов, Сопоставление схем и расчет обмоточных коэффициентов симметричных петлевых обмоток многофазного переменного тока, «Вестник электропромышленности», № 2, 1955.

84. М. Д. Каминский, Определение импедансев прямой, обратной и нулевой последовательности асинхронного двигателя по его каталожным данным, Труды Московского института механизации и электрификации сельского хозяйства, вып. VII, 1940.
85. Н. Д. Торопцев, Авт. свид. № 107711 от 4.VII 1956 г. (Бюллетень изобретений, № 7, 1957).
86. И. А. Будзко, Однофазные электродвигатели для сельскохозяйственной электрификации, Вестник сельскохозяйственной науки, Механизация и электрификация, вып. 2, 1940.
87. Г. Г. Гимоян, Некоторые особенности реле с полупроводниковыми преобразователями, «Вестник электропромышленности», № 10, 1957.
88. А. С. Касаткин, Электрические измерения, Госэнергоиздат, М., 1946.
89. И. А. Будзко, Электроснабжение сельского хозяйства зарубежных стран, «Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства», № 2, 1958, стр. 52—56.
90. Д. А. Городский, Теория однофазных асинхронных конденсаторных двигателей, Труды военно-воздушной инженерной академии им. Жуковского, вып. 619, 1957.
91. B. P. Hess, Single — phase motors, «Westinghouse Engineer», № 4, 1957, Ily, p. 120.
92. I. C. Brown, The Electric System of the Rectifiez —Type Lokomotives for the virginian Railway, «Applications and Industry», № 3, 1957, May, p. 68.
93. Z. Drab, Servomotory a jejich řizeni, «Elektrotechnik» (Praha), № 10, 1957, Ročnik XII, str. 322.
94. E. Kozie, Maszyny elekryczne ulamkowej mocy stosowane w automatyce — czesel, «Pomiary, Automatyka, Kontrola», № 1, 1958.
95. G. Lacroux, Les intezrupteurs de demarrage dans les moteurs asynchrones monophases, «Electricien», 1956, 84, p. 82 — 85.
96. Б. Н. Тихменев, Электровозы переменного тока со статическими преобразователями, Трансжелдориздат, М., 1958.
97. А. И. Адаменко, Б. А. Никитин и А. А. Войтех, Устройство для автоматического управления пуском однофазного конденсаторного двигателя, Авт. свид. № 116780, 1958 (Бюллетень изобретений № 12, 1958).
98. А. И. Адаменко, Устройство для автоматического управления пуском однофазного конденсаторного двигателя, Авт. свид. № 131161, 1958 (Бюллетень изобретений, № 5, 1958).
99. М. Н. Шеляков, Р. М. Шеляков, А. М. Шеляков, Способ включения трехфазных двигателей на однофазную сеть, Авт. свид. № 114763, 1958 (Бюллетень изобретений, № 8, 1958).
100. И. М. Постников и А. И. Адаменко, Работа трехфазных двигателей от однофазной сети напряжением 440 *в*, Журн. «Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства», № 4, 1958, стр. 58.
101. О. А. Некрасов и Г. Г. Рекус, Об одной схеме пуска асинхронного конденсаторного электродвигателя, Научные доклады высшей школы, Электромеханика и автоматика, № 1, 1958, стр. 148.
102. Г. В. Меркин, Расчет конденсаторных асинхронных двигателей, Известия высших учебных заведений, Электромеханика, № 5, 1958, стр. 35.
103. О. Н. Веселовский, Михаил Осипович Доливо-Добровольский, Госэнергоиздат, М.—Л., 1958.
104. Е. А. Грабчинский, Использование трехфазных асинхронных двигателей с применением конденсаторов при питании от однофазной сети, Журн. «Энергетик», № 2, 1959, стр. 31.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Адаменко Алексей Иванович

Однофазные конденсаторные двигатели

Печатается по постановлению ученого совета Института электротехники Академии наук Украинской ССР

Редактор издательства *Т. К. Ременик*

Технический редактор *О. А. Кадашевич* Корректоры *Г. М. Столярчук, В. В. Чуриловс*

БФ 00015. Зак. № 2340. Изд. № 453. Тираж 2500. Формат бумаги $60 \times 92^1/_{16}$. Печ. листов 15,5. Учетно-издат. листов 15,1. Подписано к печати 24.II 1960 г. Цена 9 руб.

Типография Издательства АН УССР, Киев, Репина, 2.